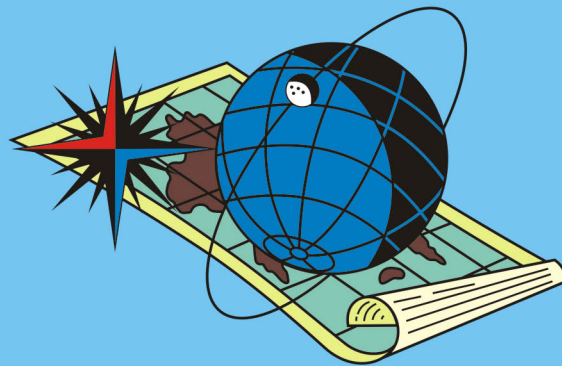


ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

№ 4 (77)  
Декабрь 2024

# НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

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

---

# **НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ**

**№ 4 (77)**

**Декабрь 2024**

**Издается 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](http://www.gningi.ru)

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

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC  
INSTITUTE**

---

**NAVIGATION AND HYDROGRAPHY**

**No 4 (77)      December 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

- К вопросу создания навигационной гидроакустической системы дальнего действия.** К. А. Виноградов, О. А. Гасников, Ю. М. Репин, К. Г. Ставров .....7
- Имитационное моделирование трафика морской акватории для планирования безопасной схемы движения судов.** В. М. Гриняк, А. В. Шуленина, И. В. Бабиев, А. В. Артемьев..... 15
- Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры сложных технических систем на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри.** А. И. Лоскутов, В. А. Клыкков, А. В. Столяров, Ю. В. Перельгин. ....27
- Тестирование глобального сервиса высокоточного определения координат Hi-RTPTM китайской компании Hi-Target.** В. М. Смолин, С. В. Решетняк, Д. Ф. Миляков, О. Л. Онищенко.. ....40
- О реализации Основ государственной политики в области военноморской деятельности Российской Федерации до 2030 года.** С. А. Пискун, А. М. Попов, А. В. Безгодов.....75

## ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

- К вопросу о методах и погрешностях расчёта скорости вертикального зондирования моря при эхолотировании.** С. И. Матрюков.....81
- Типовой раздел по обеспечению защиты государственной тайны в Техническом задании на выполнение морских исследований.** Н. С. Соколов, А. С. Тимонов.....94
- Прогнозирование приливных явлений на основе алгоритмов программного пакета OTPS и глобальной приливной модели TPXO.** А. В. Маттис, В. Ю. Бахмутов .....97

## ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

- Разработка показателя гидрометеорологической опасности физико-географических районов в интересах обеспечения группировок войск (сил).** А. А. Борисов, Н. Г. Козлов, А. Б. Маков ..... 104
- Анализ возможности применения бортовой системы регистрации параметров профиля атмосферы в Арктике.** Ю. В. Гамбургер, В. В.Дмитрук, Н. О. Моисеева..... 111

## CONTENTS

### NAVIGATION

|   |    |
|---|----|
| <b>On the Issue of Developing a Long-Range Navigational Hydroacoustic System.</b> K. A. Vinogradov, O. A. Gasnikov, Yu. M. Repin, K. G. Stavrov .....   | 7  |
| <b>Simulation Modeling of Marine Traffic for Planning a Safe Vessel Traffic Scheme.</b> V. M. Grinyak, A. V. Shulenina, I. V. Babiyeu, A. V. Artemiev.....  | 15 |
| <b>Model of Functioning of On-Board Radioelectronic Equipment of Complex Technical Systems Based on Logical-Functional Description of Interacting Elements Using Petri Net.</b> A. I. Loskutov, V. A. Klykov, A. V. Stolyarov, Yu. V. Perelygin. .... | 27 |
| <b>Testing the Global High-Precision Positioning Service Hi-RTP™ of the Chinese Company Hi-Target.</b> V. M. Smolin, S. V. Reshetnyak, D. F. Milyakov, O. L. Onishchenko.....   | 40 |
| <b>On the Implementation of the Foundations of State Policy in the Field of Naval Activities of the Russian Federation Until 2030.</b> S. A. Piskun, A. M. Popov, A. V. Bezgodov .....  | 75 |

### HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

|  |    |
|--|----|
| <b>On the Methods and Errors in Calculating the Vertical Sounding Velocity of the Sea During Echo Sounding.</b> S. I. Mastryukov .....                       | 81 |
| <b>A Typical Section on Ensuring the Protection of State Secrets in the Terms of Reference for Maritime Research.</b> N. S. Sokolov, A. S. Timonov .....     | 94 |
| <b>Forecasting of Tidal Phenomena Based on Algorithms of the OTPS Software Package and the Global Tidal Model TPXO.</b> A. V. Mattis, V. Yu. Bakhmutov ..... | 97 |

### HYDROMETEOROLOGY

|  |     |
|--|-----|
| <b>Development of an Indicator of Hydrometeorological Hazard of Physico-Geographical Areas in the Interests of Ensuring Troops (Force) Groups.</b> A. A. Borisov, N. G. Kozlov, A. B. Makov..... | 104 |
| <b>Analysis of the Possibility of Using an Airbourne Vertical Atmospheric Profiling System in Arctic.</b> Yu. V. Gamburger, V. V. Dmitruk, N. O. Moiseeva.....                                   | 111 |

---

# НАВИГАЦИЯ

---

УДК 361.626.02

## ***К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ***

**Виноградов К. А.,<sup>1</sup> Гасников О. А.,<sup>2</sup> Репин Ю. М.,<sup>2</sup> Ставров К. Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Акварин», г. Санкт-Петербург.

<sup>2</sup> АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

*Аннотация.* В статье проанализированы результаты исследований, проведенных в последние годы институтами ДВО РАН, по созданию навигационной гидроакустической системы дальнего действия. Выявлены ограничения по созданию данной системы предложенным способом. Показано, что для создания систем этого класса, обеспечивающих определение координат подводных объектов с требуемыми точностями практически во всех условиях плавания, необходимо в первую очередь решить задачу разработки методов определения скорости распространения акустических сигналов на трассах от каждого подводного звукового маяка до подводного объекта и передачи этой информации на большие (до нескольких сотен километров) расстояния.

*Ключевые слова:* навигационная гидроакустическая система, координаты, подводный объект, акустический сигнал, подводный звуковой маяк.

*Для цитирования:* Виноградов К. А., Гасников О. А., Репин Ю. М., Ставров К. Г. К вопросу создания навигационной гидроакустической системы дальнего действия // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 7–14.

## ***ON THE ISSUE OF DEVELOPING A LONG-RANGE NAVIGATIONAL HYDROACOUSTIC SYSTEM***

**Vinogradov K. A.,<sup>1</sup> Gasnikov O. A.,<sup>2</sup> Repin Y. M.,<sup>2</sup> Stavrov K. G.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Aquamarine, JSC, St. Petersburg.

<sup>2</sup>State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

*Abstract.* The article analyzes the results of research conducted in recent years by institutes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS) on the development of a long-range navigational hydroacoustic system (hydroacoustic navigation system (HNST)). The limitations on the creation of this system in the proposed way are revealed. It is shown that in order to create systems of this class that ensure the determination of the coordinates of underwater objects with the required accuracy in almost all navigation conditions, it is necessary first of all to solve the problem of developing methods for determining the propagation speed of acoustic signals on routes from each underwater sound beacon to an underwater object and transmitting this information over long (up to several hundred kilometers) distances.

*Keywords:* Navigation sonar system, coordinates, underwater object, acoustic signal, underwater sound beacon.

*For citation:* Vinogradov K. A., Gasnikov O. A., Repin Y. M., Stavrov K. G. On the Issue of Developing a Long-Range Navigational Hydroacoustic System // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 7–14.

Современный этап развития подводных технологий характеризуется существенным прогрессом в области создания морских подводных робототехнических комплексов (МПРТК), предназначенных для работы на значительном удалении от пунктов базирования и центров управления, в том числе подо льдом [1, 2]. При этом особенно актуальным становится решение задачи обзорной коррекции навигационных систем МПРТК [2, 3]. Использование для этого классической навигационной гидроакустической системы (НГС) с донными маяками-ответчиками (ДМО) требует предварительного оборудования районов работ, что является достаточно затратным, а в ряде случаев, например, в Арктике, практически невозможным [2].

В работе [4] показано, что в соответствии с требованиями Международной Гидрографической организации [5] максимально допустимая неопределенность ( $P=0,95$ ) планового положения МПРТК при выполнении гидрографических работ в шельфовой зоне Северного Ледовитого океана должна составлять около 145 м. При этом удаление от берега изобаты 200 м может достигать сотен километров.

Необходимо отметить, что задача создания НГС дальнего действия (ДД) актуальна и для координатной коррекции навигационных комплексов подводных лодок (ПЛ). При этом допустимая предельная ( $P=0,997$ ) погрешность определения координат должна составлять в зависимости от назначения ПЛ от нескольких десятков до нескольких сотен метров. В связи с этим в последние годы возродился интерес к созданию НГС дальнего действия (НГС ДД), в которых используются работающие по программе подводные звуковые маяки (ПЗМ) [6–8], в том числе, к НИОКР, ранее доведенным до серийного выпуска, но потом прекращенным [9, 10].

В настоящее время вопросы создания НГС ДД изучаются в ДВО РАН при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований [2, 6, 11–17].

В ходе этих исследований сформулированы основные требования, выполнение которых позволит повысить эффективность НГС ДД [8]:

- использование в НГС ДД сложных сигналов (предлагается использовать фазоманипулированные сигналы, например,  $M$ -последовательности);
- высокоточное определение скорости распространения гидроакустических сигналов за счет использования прямых акустических лучей в каналах связи передающей гидроакустической станции (ПГС) – МПРТК;
- высокоточное определение времени прихода навигационных сигналов путем выбора оптимальных параметров  $M$ -последовательностей (частота, количество символов, количество периодов на символ) и привязки излучаемых импульсов к системе единого времени как на ПГС, так и в приемной аппаратуре МПРТК;
- расширение возможностей систем управления, телеметрии и навигационной системы за счет работы с ансамблем ортогональных навигационных сигналов и периодической коррекции бортовых часов по сигналам единого времени.

Задачу высокоточного определения скорости распространения гидроакустических сигналов предлагается решать [8, 13, 17] за счет установки передающего устройства в прибрежных районах с отрицательной рефракцией скорости распространения звука (СРЗ), что приводит к формированию придонного звукового канала (ПЗК) на континентальном шельфе и переходу акустической энергии в ПЗК в глубоком море, на оси которого СРЗ наиболее стабильна. При этом необходимо рассчитывать эффективную (среднюю) скорость с учетом вклада СРЗ на

шельфе. Следовательно, необходимо произвести измерение СРЗ с АНПА и в месте установки ПГС. При этом среднее значение СРЗ предлагается определять по формуле (1).

$$c_{\text{ср}} = c_{\text{ш}} \frac{D_{\text{ш}}}{D_{\text{ПЗК}} + D_{\text{ш}}} + c_{\text{ПЗК}} \frac{D_{\text{ПЗК}}}{D_{\text{ПЗК}} + D_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где  $D_{\text{ш}}$  и  $D_{\text{ПЗК}}$  – длины частей трассы на шельфе и в глубоком море соответственно;  $c_{\text{ш}}$  и  $c_{\text{ПЗК}}$  – СРЗ на шельфе и в глубоком море.

Привязку сигналов к системе единого времени как на ПГС, так и в приемной аппаратуре МПРТК, предлагается осуществлять за счет использования опорных кварцевых генераторов с долговременной относительной нестабильностью  $10^{-6} - 10^{-9}$ , что по оценкам, приведенным в работах [8, 13], обеспечит потенциальную (инструментальную) погрешность определения дальности на уровне единиц метров за время работы, превышающее шесть месяцев.

Для реализации указанных требований ПГС должна иметь в своем составе [12]:

- опорный генератор для формирования временной шкалы и модуляции передающей частоты;
- НАП СНС для периодической коррекции временной шкалы;
- аппаратуру для передачи на МПРТК измеренных на ПГС значений СРЗ.

В обоснование предложенных подходов был проведен ряд экспериментальных исследований [12–17].

В работе [17] приведены данные о погрешностях определения дистанции от ПГС до имитирующего МПРТК радиогидроакустического буя (РГБ), полученные при проведении экспериментальных работ при наиболее корректном определении места по данным установленной в РГБ навигационной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (НАП СНС).

Работы проводились в Японском море на дальности ПГС – ГБ около 300 км (рис. 1).

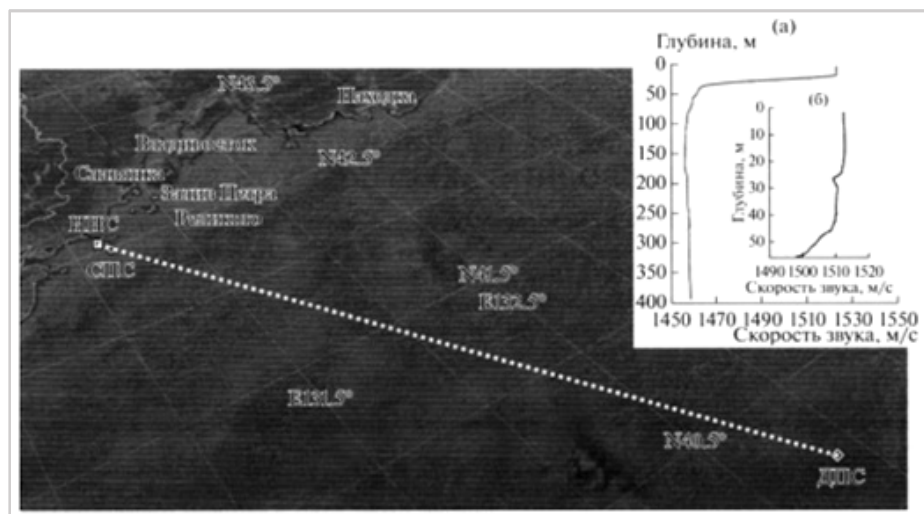
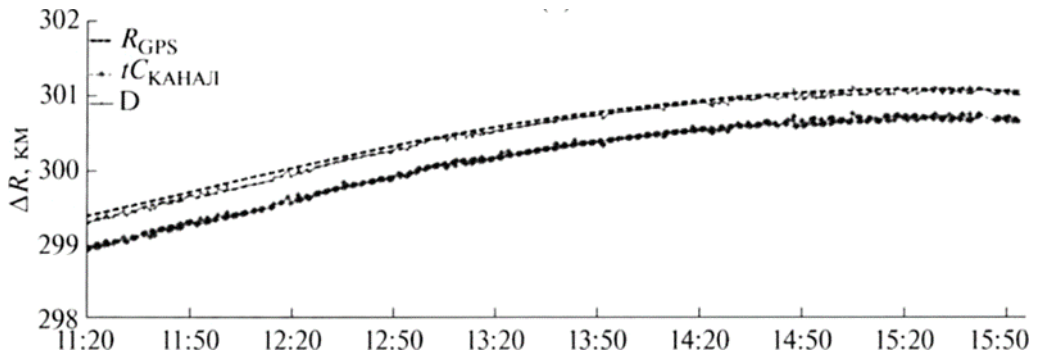


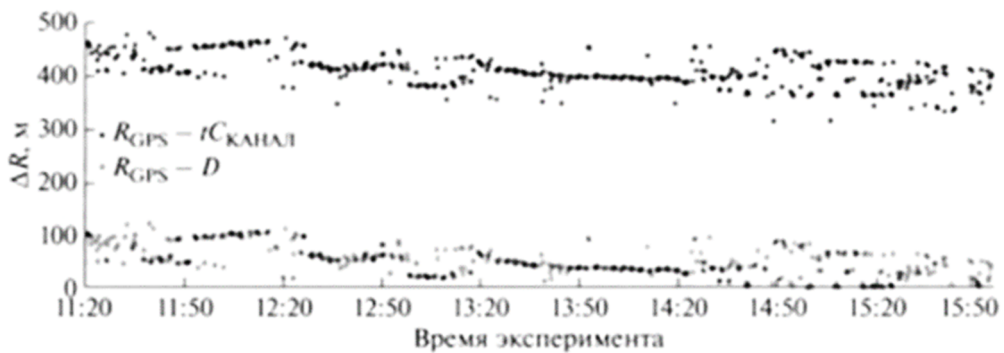
Рис. 1. Схема эксперимента и вертикальные профили скорости звука (ВРСЗ):  
*a* – ВРСЗ в точке постановки РГБ; *б* – ВРСЗ в точке постановки ПГС

Гидрофон РГБ заглублялся на ось ПЗК (глубина 150 м), а на обеспечивающее судно (яхту) по УКВ-линии связи передавалась получаемая им акустическая информация и данные НАП СНС. ПГС в течение 4 часов излучал один раз в 3 минуты сигнальный пакет, состоящий из пяти фазоманипулированных  $M$ -последовательностью сигналов с центральной частотой 400 Гц (длина последовательности 1023 символа, 4 периода несущей частоты на символ). Временной интервал между соседними сигналами в пакете составлял 20 с. При этом для всего времени эксперимента (4 часа) математическое ожидание погрешности определения дальности в 95 % интервале составило  $84 \pm 2,5$  м при среднем квадратическом отклонении 29 м (рис. 2). Правда, при этом в работе [17] не указывается, каким образом на РГБ передавались данные о СРЗ на шельфе.

В соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [18] полная средняя квадратическая погрешность (СКП) определения дальности в этом случае составляет 37,8 м, что достаточно хорошо коррелируется с полученными ранее, например, в статье [13], оценками. Следовательно, при определении дальностей до трех подводных звуковых маяков (ПЗМ) с указанными выше погрешностями и углах пересечения дальномерных линий положения около  $90^\circ$  СКП определения координат составит [19] около 40 м.



*а*



*б*

Рис. 2. Результаты измерений: *а* – оценки значений расстояний ПЗМ-РГБ; *б* – разность в определении расстояний между данными НАП СНС и гидроакустической дальномерной системой

Проведенные оценки показывают, что предложенный подход к созданию НГС ДД принципиально позволяет решать задачу определения координат МПТРК и ПЛ с требуемой точностью в районах, где имеется ПЗК, как на шельфе, так и в глубоком море при удалении от ПЗМ до нескольких сотен километров. К этим районам относятся Атлантический и Тихий океан с их окраинными морями. Однако использование этого подхода для определения координат ПЛ требует их нахождения вблизи оси ПЗК, что негативно отразится на их скрытности. Кроме того, в океанах (кроме Северного Ледовитого) ось ПЗК находится на глубинах 800–1200 м (например, как показано на рис. 3), что, естественно, неприемлемо для современных ПЛ, не рассчитанных на такие глубины погружения. Кроме того, размещение ПЗМ в шельфовых зонах большинства морей Атлантического океана практически нереально, так как они омывают побережья стран-членов НАТО.

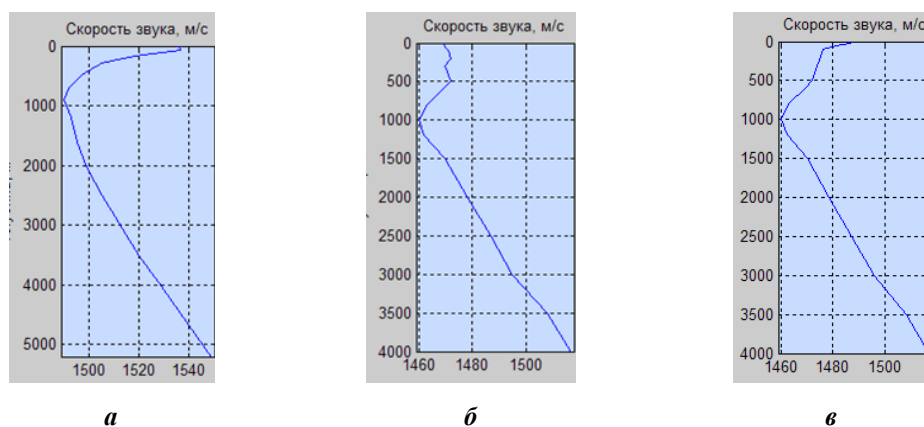


Рис. 3. Типовые ВРСЗ для Атлантического океана (а) и Норвежского моря зимой (б) и летом (в) по данным [20]

Особый интерес представляет оценка возможности использования НГС ДД предложенного типа подо льдом в условиях Арктики, где ось ПЗК находится вблизи или непосредственно у покрытой льдом поверхности (см., например, рис. 4), что требует подвсплытия на опасные, с точки зрения столкновения со льдом, глубины.

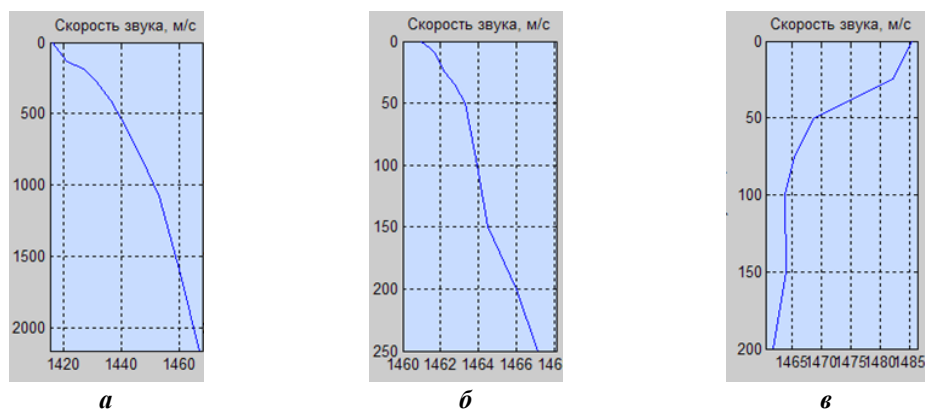


Рис. 4. Типовые ВРСЗ для Северного Ледовитого океана (а) и Баренцева моря зимой (б) и летом (в)



Кроме того, в этом случае звук распространяется на большие расстояния путем многократных отражений от нижней поверхности льда, к которой лучи возвращаются вследствие положительной рефракции [21]. Одной из характерных особенностей распространения звука в этих условиях является его аналогия с прохождением сигнала через полосовой фильтр: высокие частоты быстро затухают вследствие потерь при отражении от ледового покрова, а низкие – из-за слабого их захвата звуковым каналом. Экспериментально установлено, что в арктических морях [21]:

- наилучшее распространение имеет место в октавной полосе приблизительно от 15 до 30 Гц. Правда, в пределах этой полосы пропускания имеет место дисперсия звука, что может существенно увеличить погрешности определения дистанции до ПЗМ;

- переход на более высокие частоты, например, 300–800 Гц приводит к резкому возрастанию потерь при распространении. Так, например, на расстоянии 200 км эти потери примерно на 55 дБ превышают потери при сферическом расширении сигнала.

Необходимо отметить, что погрешность определения координат с помощью НГС ДД, обеспечивающей работу практически во всех районах Мирового океана, зависит, в первую очередь, от погрешности определения СРЗ на трассах от каждого ПЗМ до подводного объекта.

В настоящее время для решения аналогичных задач в практической гидроакустике используется метод опорных точек – метод систематизации, обработки и обобщения банка океанографических данных, разработанный для районирования условий рефракции в морях и океанах и их статистического (вероятностного) описания в выделенных районах в рамках плоско-слоистой модели морской среды [22]. В несколько упрощенном варианте он практически используется для кусочно-линейной аппроксимации функций, заданных в табличном или графическом виде. Именно так и представляются в банке океанографических данных ВРСЗ, полученные по данным измерения на горизонтах наблюдения температуры и солёности морской воды.

Вместе с тем, несмотря на достоинства метода опорных точек по сравнению с известным климатолого-статистическим методом, исследования стратификации гидрофизических полей [22], полученные по банкам океанографических данных значения СРЗ отягощены недопустимыми, по нашему мнению, для НГС ДД погрешностями. Так, например, приведенные в работе [22] данные, показывают, что среднее квадратическое отклонение СРЗ составляет от 2 м/с для горизонтов от 150 до 7000 м до 12 м/с для горизонтов 0–10 м, что составляет от 0,13 до 0,8 % от реальной СРЗ. Следовательно, и СКП определения дальномерной линии положения может достигать 0,8 % расстояния от подводного объекта до ПЗМ и, например, на дальностях 100 км может составить 0,8 км, что неприемлемо как для ПЛ, так и МПРТК.

Кроме того, результаты предварительной оценки качества сеточных массивов гидрофизических полей показали [23], что невязки между ними растут с увеличением широты, достигая севернее 74–76° с. ш. более 2 °С по температуре, что соответствует 8 м/с по СРЗ.

Таким образом, современный этап развития подводных технологий требует создания НГС ДД, обеспечивающих работу практически во всех районах Мирового океана. Для решения этой задачи, по нашему мнению, в первую очередь необходимо разработать методы периодического уточнения (с требуемой точностью) скорости распространения акустических сигналов на трассе (с учетом ее гидрологических и

морфологических характеристик) от каждого ПЗМ до подводного объекта и решить задачу передачи этой информации на большие расстояния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боженов Ю. А. Использование необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктиды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4. – № 1. – С. 4–68.
2. Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Методы навигации АНПА большой автономности // *Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»*. – Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 380–386.
3. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А. В. Инзарцев, Л. В. Киселев, В. В. Костенко, Ю. В. Матвиенко, А. М. Павин, А. Ф. Щербатюк. Отв. ред. Л. В. Киселев. – Владивосток: ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. – 368 с.
4. Зубченко Э. С., Шарков А. М. Современные подходы к съемке рельефа дна в акватории Северного Ледовитого океана // *Навигация и гидрография*. – 2018. – № 54. – С. 38–43.
5. IHO Standards for Hydrographic Surveys 5-th Edition, February 2008. Special Publication No 44.
6. Моргунов Ю. Н., Тагильцев А. А., Безответных В. В., Буренин А. В., Голов А. А. Патент РФ 2469346. Способ позиционирования подводных объектов. Заявл. 11.07.2011. Опубл. 10.12.2012. Бюлл. № 34.
7. Pomerleau M. DARPA Dives into Underwater Navigation Project // *Defense Systems*. – 2016 URL: <https://defensystems.com/articles/2016/05/19navi-darpa-bae-underwater-navigation-system.aspx>.
8. Солощев А. Н., Якушев А. А., Ярошенко С. А., Леньков В. П., Моргунов Ю. Н. Возможные пути повышения точности определения координат места и скорости автономных необитаемых подводных аппаратов гидроакустической навигационной системой, работающей на большой дальности // *Навигация и гидрография*. – 2017. – № 49. – С. 46–50.
9. Виноградов К. А., Новиков И. А. Гидроакустические навигационные системы и средства // *Навигация и гидрография*. – 1998. – № 7. – С. 64–70.
10. Волосов П. С., Федотов А. В. Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт МО РФ – некоторые исследования в гидроакустике // В кн. *Из истории отечественной гидроакустики*. – СПб, 1998. – С. 532–535.
11. Акуличев В. А., Бородин А. Е., Буренин А. В., Моргунов Ю. Н., Стробыкин Д. С. Применение сложных сигналов в дальней навигации подводных объектов // *Докл. РАН*. – 2007. – Т. 417. – № 5. – С. 693–696.
12. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Бородин А. Е., Буренин А. В., Войтенко Е. А. Исследование особенностей функционирования региональной системы подводного навигационного обеспечения в различных гидрологических условиях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2016. – Т. 9. – № 3. – С. 80–86.
13. Безответных В. В., Буренин А. В., Моргунов Ю. Н., Половинка Ю. А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // *Акустический журнал*. – 2009. – Т. 55. – № 3. – С. 374–380.
14. Буренин А. В., Безответных В. В., Моргунов Ю. Н. Зондирование морской среды низкочастотными псевдослучайными сигналами из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // *Современные технологии и развитие политехнического образования. Международная научная конференция, 19-23 сентября 2016, Владивосток. ДВФУ*. – С. 655-659.
15. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // *Акустический журнал*. – 2016. – Т. 62. – № 3. – С. 341–347.
16. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Голов А. А. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // *Акустический журнал*. – 2017. – Т. 63. – № 6. – С. 646–650.

17. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Голов А. А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64. – № 2. – С. 191–196.
18. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2013.
19. Практическое кораблевождение. Книга первая / Отв. ред. А. П. Михайловский – Б. м. ГУНиО МО. 1988 (№ 90351).
20. Портал ЕСИМО URL: <http://esimo.ru/portal> [электронный ресурс]. Дата обращения 20.10.2024.
21. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 444 с.
22. Гасников О. А., Удалов В. В., Филин В. А. Сущность метода вероятностного описания условий рефракции звука в районах океана // Навигация и гидрография. – 2009. – № 28. – С. 83–92.
23. Гасников О. А., Гусева В. И., Костенич А. В., Мاستрюков С. И., Ставров К. Г., Соболева М. Н. Основные положения концепции создания библиотеки сеточных баз показателей состояния морской природной среды для информационной поддержки гидроакустических расчетов // Навигация и гидрография. – 2018. – № 51. – С. 63–70.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*ВИНОГРАДОВ Константин Анатольевич*, старший научный сотрудник, главный специалист по навигационным гидроакустическим системам АО «АКВАМАРИН», кандидат технических наук, e-mail: [mail@aquamarin.ru](mailto:mail@aquamarin.ru).

*Konstantin A. VINOGRADOV*, Senior Researcher, Chief Specialist in navigation sonar systems of AQUAMARINE, Candidate of Sciences, e-mail: [mail@aquamarin.ru](mailto:mail@aquamarin.ru).

*ГАСНИКОВ Олег Александрович*, начальник отдела НИОЦ АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат технических наук, e-mail: [gasole@rambler.ru](mailto:gasole@rambler.ru).

*Oleg A. GASNIKOV*, Chief of division of oceanographic center of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Candidate of Sciences, e-mail: [gasole@rambler.ru](mailto:gasole@rambler.ru).

*РЕПИН Юрий Михайлович*, начальник отдела АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», e-mail: [mail@gningi.ru](mailto:mail@gningi.ru).

*Yuri M. REPIN*, Chief of division of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, e-mail: [mail@gningi.ru](mailto:mail@gningi.ru).

*СТАВРОВ Константин Георгиевич*, главный научный сотрудник НИОЦ АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, профессор, e-mail: [stavrov@gningi.ru](mailto:stavrov@gningi.ru).

*Konstantin G. STAVROV*, Head researcher of oceanographic center of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Doctor of Sciences, professor, e-mail: [stavrov@gningi.ru](mailto:stavrov@gningi.ru).

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА МОРСКОЙ АКВАТОРИИ  
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОЙ СХЕМЫ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ****Гриняк В. М.<sup>1</sup>, Шуленина А. В.<sup>2</sup>, Бабиев И. В.<sup>1</sup>, Артемьев А. В.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Владивостокский государственный университет, г. Владивосток.<sup>2</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток.<sup>3</sup>Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток.

*Аннотация.* Работа посвящена проблеме планирования схемы маршрутов судов через акватории с интенсивным движением. Рассматривается задача разработки имитационной модели коллективного движения судов с целью априорной оценки безопасности той или иной схемы движения. В статье показаны основные параметры предложенной модели и результаты имитационного моделирования движения судов в заливе Находка.

*Ключевые слова:* безопасность судоходства, управление движением судов, система установления путей движения, интенсивное движение, опасное сближение, судопотоки, имитационное моделирование.

*Для цитирования:* Гриняк В. М., Шуленина А. В., Бабиев И. В., Артемьев А. В. Имитационное моделирование трафика морской акватории для планирования безопасной схемы движения судов // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 15–26.

***SIMULATION MODELING OF MARINE TRAFFIC FOR PLANNING A SAFE  
VESSEL TRAFFIC SCHEME*****Grinyak V. M.<sup>1</sup>, Shulenina A. V.<sup>2</sup>, Babiyev I. V.<sup>1</sup>, Artemiev A. V.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Vladivostok State University, Vladivostok.<sup>2</sup>Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok.<sup>3</sup>Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

*Abstract.* The paper is devoted to the problem of planning the scheme of vessel routes through water areas with intensive traffic. The problem of developing a simulation model of collective vessel traffic for the purpose of a priori assessment of the traffic scheme safety is considered. The paper shows the main parameters of the proposed model and the results of the vessel traffic simulation in Nakhodka Bay.

*Keywords:* maritime safety, marine traffic control, traffic pattern, traffic intensity, collision risk assessment, ships flows, simulation modeling.

*For citation:* Grinyak V. M., Shulenina A. V., Babiyev I. V., Artemiev A. V. Simulation Modeling of Marine Traffic for Planning a Safe Vessel Traffic Scheme // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 15–26.

**Введение**

В настоящее время наблюдается постоянный рост объемов морских перевозок. Это приводит к увеличению числа акваторий с интенсивным трафиком. Традиционный подход к обеспечению навигационной безопасности движения судов заключается в регулировании отдельных участников движения. Их индивидуальное «поведение» рассматривается в контексте задач оценки риска опасного сближения судов, предотвращения их сближения и планирования безопасного пути [1]. На

акваториях с интенсивным движением этого может быть недостаточно – для обеспечения безопасного движения группы судов требуется координация действий всех участников группы [2, 3]. Одной из форм такой координации является установление на акватории правил движения: схемы безопасного движения или системы установления путей движения судов [4]. Планирование таких схем движения представляет собой актуальную и ёмкую научно-техническую задачу.

До появления современных автоматизированных средств судовождения планирование схемы движения на акватории происходило с учётом гидрографических особенностей выбранного района. Команды специалистов стремились создать максимально безопасные схемы движения, однако в условиях ограниченных возможностей навигации прошлых лет важным было наличие визуальных ориентиров, помогавших судоводителю следовать по выбранной траектории [5]. При недостатке естественных ориентиров (приметные мысы, горы, острова) создавались искусственные (буи, створные знаки, маяки). Возможные для реализации схемы движения соотносились с правилами судовождения и выбирались наиболее удобные для работы судоводителей и персонала береговых служб. Создаваемые таким образом схемы характеризовались не столько оптимальными решениями с точки зрения безопасности и пропускной способности, сколько простотой маневрирования. Позднее, при росте интенсивности трафика, нередко проявлялись ограничения таких «старых» схем [6, 7].

В условиях наступившей цифровой эпохи и развития нового поколения навигационных средств суда могут реализовать любые маршруты, допустимые их кинематикой, динамическими свойствами и географией акватории, без ограничений, связанных с использованием визуальных ориентиров. Это даёт возможность установить другие – более безопасные и производительные схемы движения судов.

В работах, опубликованных ранее, авторами изучались возможные подходы к планированию схем безопасного движения судов и оценке безопасности уже существующих схем. Так, в статьях [6, 7] была рассмотрена метрика оценки опасности схемы движения, существующей на выбранной акватории, основанная на частоте рисков опасных сближений судов. Эта частота определялась на основе ретроспективных данных о движении при помощи оценки числа и локализации точек кратчайшего сближения (СПА). В статье [8] была предложена целая система подобных метрик. Метрики основывались на учёте таких особенностей трафика как интенсивность, регулярность движения, характер распределения судов по акватории, что, наряду с прочим, позволило оценить насыщенность трафика [9]. Дополняя друг друга, метрики дают интегрированную оценку опасности того или иного района плавания.

В развитие проведённых исследований в статье [10] даётся формализованная постановка задачи планирования схемы безопасного движения на акватории. Показано многообразие возможных метрик для оценки опасности. Отмечено, что прямое решение задачи подбора множества возможных маршрутов судов, оптимизирующего заданный критерий, имеет очень высокую сложность и вряд ли возможно типовыми вычислительными средствами. В качестве альтернативного подхода авторы предложили интерпретировать схему движения как «конструктор» из примитивов, выделив четыре таких примитива:

- пересекающиеся судопотоки с односторонним движением,

- пересекающиеся судопотоки с двусторонним движением и близкой интенсивностью,
- пересекающиеся судопотоки с двусторонним движением и различной интенсивностью,
- судопотоки, пересекающиеся с зоной кругового движения.

Для каждого из примитивов могут быть оценены возможные метрики оценки опасности (выбор метрик и их значения зависят от предполагаемой интенсивности трафика, проходящего через примитив). Конструируя далее из набора примитивов возможные варианты схемы движения, можно оценить значения метрик опасности для акватории в целом при каждом варианте схемы. В статье [10] отмечалось, что полученные таким образом значения метрик опасности будут соответствовать некоторому «идеальному» варианту трафика, более полное (отвечающее реальному трафику) представление характерных особенностей движения на акватории требует проведения вычислительных экспериментов. Это, в свою очередь, требует разработки специальных имитационных моделей для численного моделирования трафика той или иной акватории. Настоящая работа посвящена описанию такой имитационной модели и некоторых результатов её использования при планировании схемы безопасного движения судов.

### Основные модельные представления

Рассмотрим модель морской акватории, где выделены области, допустимые для движения судов. Типичные размеры морских акваторий, для которых планируются схемы движения, обычно не превышают 100 км, поэтому можно пренебречь шарообразностью Земли и использовать для моделирования прямоугольные декартовы координаты.

Введём на границах и внутри моделируемой акватории зоны «входа» на акваторию  $IN_i$  и зоны «выхода» из акватории  $OUT_j$ . Будем задавать свойства судопотока  $A_{ij}$ , следующего из зоны входа с номером  $i$  в зону выхода с номером  $j$  кортежем значений, характеризующих интенсивность судопотока, распределение судов по размерам, распределение судов по скоростям и динамические траекторные свойства судов. Зададим величину  $T$  – интервал времени, используемый для моделирования движения судов (шаг работы имитационной модели).

Зададим интенсивность судопотока из зоны  $IN_i$  в зону  $OUT_j$  величиной  $INTENCITY_{ij}$ , характеризующей среднее количество судов, выходящих из зоны  $IN_i$  в направлении  $OUT_j$  за единицу времени. Добавление нового судна к судопотоку  $A_{ij}$  происходит при реализации на каждом временном интервале  $T$  следующей процедуры:

ЕСЛИ  $rand < T * INTENCITY_{ij}$ , то добавить судно в зону  $IN_i$ ,

где  $rand$  – генерируемое случайное число, равномерно распределённое в интервале  $[0, 1]$ . Считается, что интервал  $T$  достаточно мал, чтобы величина  $T * INTENCITY_{ij}$  была меньше 1. Начальные координаты судна задаются случайно, так, чтобы оно оказалось в соответствующей зоне  $IN_i$ . Удаление судна из судопотока происходит при достижении им зоны выхода из акватории.

При задании размеров судов будем иметь в виду, что в задачах обеспечения навигационной безопасности судовождения традиционно используют некую «зону безопасности» вокруг судна (корабельный домен), в которую не допускается вторжение других судов. В рассматриваемой имитационной модели будем

представлять эту зону безопасности в виде круга заданного радиуса. Примем, что радиусы зон безопасности судов, добавляемых системой к судопотоку, характеризуются случайной величиной с заданным распределением. Скорости судов также являются случайными величинами с известным распределением и могут коррелировать с их размерами (например, быть больше для малых судов).

К динамическим траекторным свойствам судов относятся их пропульсивная способность и маневренность. Первая характеризуется ускорениями при увеличении и уменьшении скорости судна, вторая – радиусом поворота.

Каждый судопоток  $A_{ij}$  имеет свою конфигурацию на акватории, включающую в себя ломаную, вдоль которой происходит движение судов и ширину судопотока (она может быть как постоянной, так и изменяться) (рис. 1).

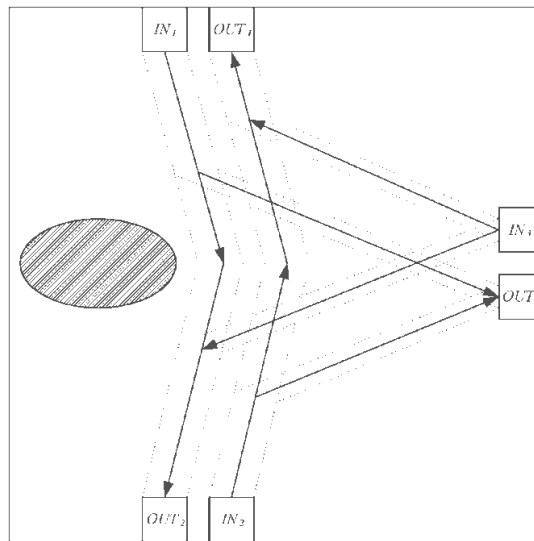


Рис. 1. Пример конфигурации судопотоков при моделировании (объяснения – в тексте)

На рис. 1 показана идея представления модели схемы движения судов на морской акватории. В рассмотренном примере имеются три зоны входа на акваторию –  $IN_1, IN_2, IN_3$  и три зоны выхода из акватории –  $OUT_1, OUT_2, OUT_3$ . Стрелками показаны направления движения судов, пунктирными линиями – ширина судопотока. Интенсивность и ширина судопотока между зонами 1 и 2 существенно выше, чем между ними и зоной 3. Заштрихованным овалом показана зона, запрещённая для плавания.

Движение судов описывается следующими дискретными кинематическими уравнениями:

$$x_{t+T} = x_t + T * V_t \sin K_t,$$

$$y_{t+T} = y_t + T * V_t \cos K_t,$$

$$V_{t+T} = V_t + \Delta V_t + \delta V_t,$$

$$K_{t+T} = K_t + \Delta K_t + \delta K_t,$$

где  $t$  – выбранный момент времени,  $x, y$  – относительные координаты судна,  $V$  и  $K$  – скорость и курс судна;  $\Delta V$  и  $\Delta K$  – величины, характеризующие детерминированное изменение скорости и курса судна в связи с ускорением (замедлением) или движением по кривой, при прямолинейном и равномерном движении судна на заданном участке судопотока эти величины равны 0;  $\delta V, \delta K$  – величины, характеризующие случайное изменение скорости и курса, погрешности в движении (эти погрешности могут быть связаны как с самим судном, так и с воздействием ветра, волн, течения). При моделировании величины  $\Delta V$  и  $\Delta K$  подбираются таким образом, чтобы судно двигалось в пределах заданной геометрии судопотока и с допустимыми для того или иного участка судопотока скоростью и курсом.

Возможны различные метрики, характеризующие безопасность движения [8, 9], в настоящей работе рассматривается метрика, связанная с подсчётом количества опасных сближений судов на том или ином участке акватории. Количество опасных сближений оценивается следующим образом. Акватория разбивается на небольшие участки (например, квадраты), и для каждого участка создаётся счётчик, подсчитывающий число опасных сближений. В каждый моделируемый момент времени  $t$  вычисляется расстояние между судами (для каждой пары «судно – судно»). Если расстояние между судами пары оказалось меньше суммы радиусов их зон безопасности, то считается, что суда опасно сблизились, и счётчик соответствующего участка акватории увеличивается на 1 (за координаты точки сближения принимается точка кратчайшего сближения – СРА). При этом возможны два варианта дальнейшей интерпретации задачи, их можно условно назвать «с возвращением» и «без возвращения». При первом варианте сблизившиеся суда продолжают участвовать в процессе моделирования, в следующие моменты по ним также проводится расчёт количества опасных сближений. При втором считается, что сблизившаяся пара судов уже «внесла свой вклад» в значение метрики и соответствующие ей счётчики не увеличиваются. Расчёты по первому варианту значительно искажают полученную картину опасных участков акватории, особенно при малых значениях времени  $T$ , однако позволяют проводить верификацию работы системы. Расчёты по второму варианту более информативны с точки зрения дальнейшей интерпретации экспертами полученной картины распределения числа опасных сближений.

Таким образом, каждый моделируемый судопоток характеризуется следующими величинами:

- расположением и размерами соответствующих зон входа на акваторию  $IN_i$  и выхода из акватории  $OUT_j$ ;
- координатами точек ломаной, задающей геометрию судопотока и шириной судопотока на каждом участке;
- интенсивностью судопотока  $INTENSITY_{ij}$ ;
- распределением размеров судов;
- распределением скоростей судов.

На каждой итерации моделирования движения к судопотоку добавляются (соответственно его интенсивности) новые суда. Суды, достигшие зоны выхода из акватории, удаляются из судопотока.

Каждое моделируемое судно характеризуется следующими величинами:

- координатами точки начала движения, находящейся в одной из зон входа на акваторию;



- судопотоком, которым судно будет следовать до зоны выхода из акватории;
- начальной скоростью  $V$ , определяемой распределением скоростей судов, движущихся в судопотоке;
- начальным курсом судна  $K$ , определяемым направлением движения в судопотоке;
- максимальными значениями величин  $\Delta V$  и  $\Delta K$ , определяемыми маневренностью судна по скорости и курсу;
- распределением случайных величин  $\delta V$  и  $\delta K$ , характеризующих погрешности движения;
- радиусом зоны безопасности судна, определяемой распределением размеров судов, движущихся в судопотоке.

На каждой итерации моделирования движения определяются текущие значения величин коррекции скорости и курса  $\Delta V$  и  $\Delta K$  и текущие координаты, скорость и курс судна, расстояния «судно – судно» для каждой пары судов, корректируется число опасных сближений.

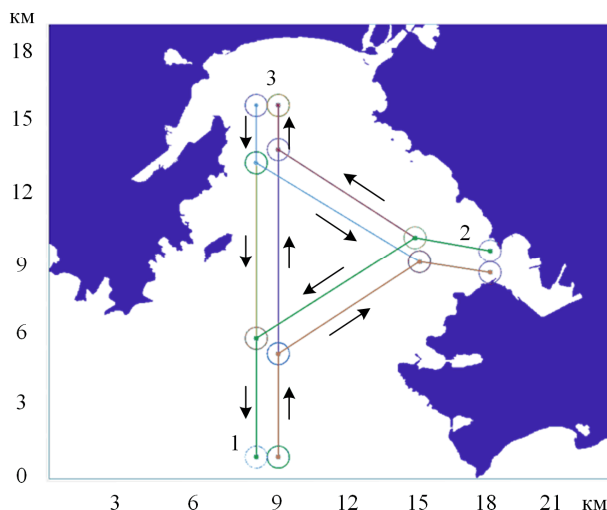
### Результаты имитационного моделирования

Для имитационного моделирования движения судов была разработана специальная программная система [11], позволяющая задавать параметры судопотоков, разбиение акватории на участки, величину интервала моделирования  $T$  и оценивающая опасность того или иного участка акватории по выбранной метрике. Ниже приводятся некоторые результаты моделирования трафика для ряда типичных конфигураций схемы движения с оценкой опасности по метрике, связанной с подсчётом количества опасных сближений судов.

Для демонстрации возможностей планирования схемы безопасного движения судов моделировалась конфигурация судопотоков, похожая на принятую в настоящее время в заливе Находка. На рис. 2 показан возможный вариант схемы движения судов между входом в залив (зоны входа и выхода 1), бухтой Врангеля (зоны входа и выхода 2) и бухтой Находка (зоны входа и выхода 3). Движение судов на рис. 2 происходит по двусторонним пересекающимся потокам с близкой интенсивностью.

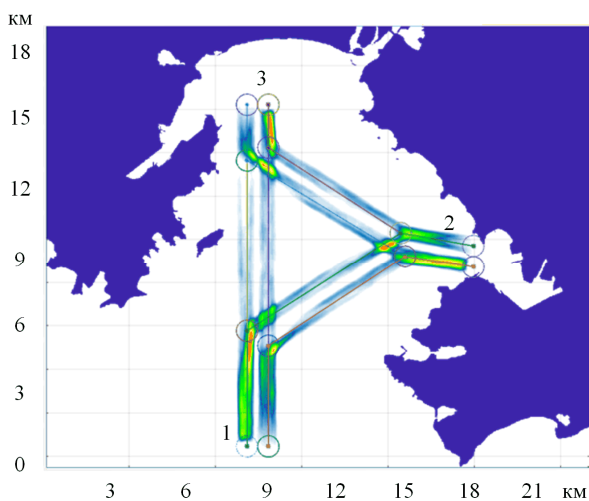
При моделировании были приняты следующие параметры судопотоков и судов:

- интервал моделирования  $T$  равен 1 минуте;
- интенсивность судопотоков 1-2, 2-1, 1-3, 3-1, 2-3, 3-2 одинакова и равна 6 судов в час;
- скорости судов равномерно распределены в интервале от 15 до 30 узлов, случайное отклонение скорости  $\delta V$  равномерно распределено в интервале  $\pm 1,5$  узлов;
- случайное отклонение курса  $\delta K$  равномерно распределено в интервале  $\pm 2$  градуса;
- радиус зоны безопасности судов принят детерминированным (для простоты моделирования) и равным 300 метров;
- с целью подсчета числа опасных сближений акватория разбивается на квадратные участки размером 0,01 морской мили (18,52 метров).

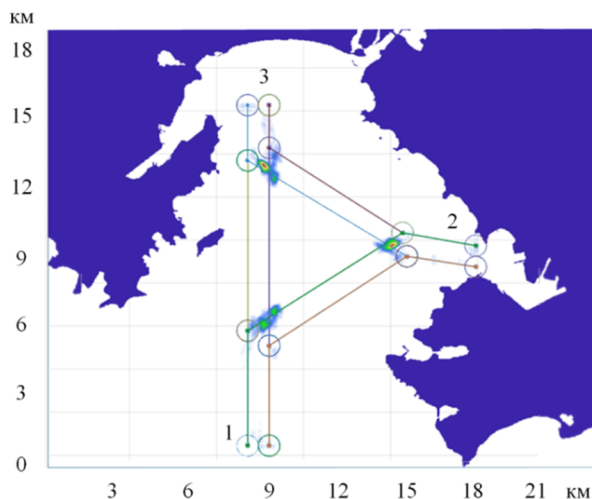


**Рис. 2. Моделируемая конфигурация схемы движения судов для залива Находка**

На рис. 3 и 4 показан результат подсчёта количества опасных сближений при движении судов по схеме рис. 2. Моделирование движения проводилось в течение 10 дней (то есть вычисления проводились для 60 мин. \*24 часа\*10 дней = 14400 итераций моделирования). Было зафиксировано 123 410 опасных сближений при схеме подсчёта «с возвращением» (рис. 3) и 3 263 опасных сближений при подсчёте «без возвращения» (рис. 4). Рис. 3 построен в относительной шкале: красный цвет соответствует 100 % от максимального количества опасных сближений на локальном квадратном участке, желтый – 60 %, зелёный – 40 %, синий – 20 %. Рис. 4 (а также рис. 5, 6) построен в абсолютной шкале: красный цвет равен 40 опасным сближениям за весь период моделирования, желтый – 25, зелёный – 16, синий – 8.



**Рис. 3. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (двусторонние пересекающиеся судопотоки, подсчёт «с возвращением») (объяснения – в тексте)**



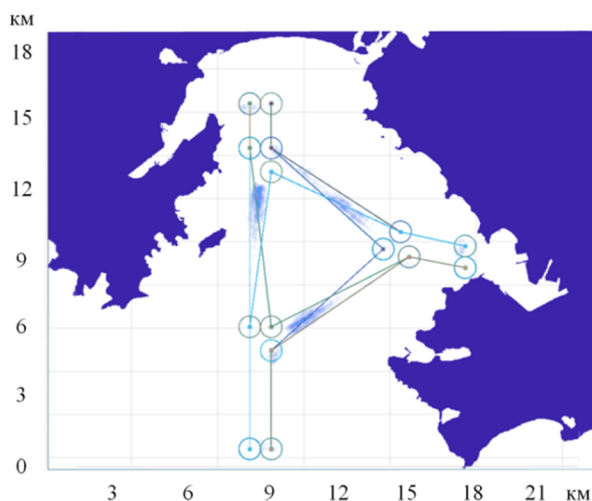
**Рис. 4. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (двусторонние пересекающиеся судопотоки, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)**

«Тепловая карта» рис. 3 и 4 показывает те участки акватории, где суда опасно сближаются чаще всего. На рис. 3 видно, что главным образом это зоны пересечения судопотоков и те их участки, на которых суда как бы «догоняют» друг друга. Способ построения рис. 4 выделяет участки, на которых суда опасно сближаются, двигаясь пересекающимися курсами.

Рассмотрим «альтернативные» варианты схемы движения для залива Находка. На рис. 5, 6 показаны результаты подсчёта количества опасных сближений судов при переходе к круговой схеме движения (подсчёт «без возвращения»).



**Рис. 5. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (круговое движение вариант 1, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)**



**Рис. 6. Результаты оценки количества опасных сближений в заливе Находка (круговое движение вариант 2, подсчёт «без возвращения») (объяснения – в тексте)**

На рис. 6 пересечение судопотоков идёт под более острым углом, чем на рис. 5, что приводит к ожидаемому уменьшению числа опасных сближений и на акватории в целом (2 486 сближений на рис. 5 и 2301 сближений на рис. 6) и локально, в зонах сближения судов (на рис. 4 есть красные и жёлтые участки, на рис. 5 – зелёные, на рис. 6 – только синие).

#### Результаты имитационного моделирования движения судов в заливе Находка

|   | Схема движения                                  | Число опасных сближений на акватории в целом | Средний интервал между опасными сближениями (мин.) | Максимальное число опасных сближений на локальном участке |
|---|---|--|--|---|
| 1 | Двусторонние пересекающиеся судопотоки (рис. 4) | 3 263  | 4,4  | 44  |
| 2 | Круговое движение, вариант 1 (рис. 5)           | 2 486  | 5,8  | 28  |
| 3 | Круговое движение, вариант 2 (рис. 6)           | 2 301  | 6,3  | 15  |

Результаты моделирования рис. 3–5 сведены в таблицу, где показан также средний интервал между опасными сближениями. Его увеличение при переходе к круговой схеме движения с 4,4 мин. до почти 6 мин. существенно снижает нагрузку на операторов береговых систем управления движением судов, так как даёт больше времени на реагирование и отдачу команд участникам движения, уменьшает возможность наступления нескольких опасных ситуаций одновременно.

### Обсуждение результатов

Рассмотренный подход к моделированию трафика в целом позволяет оценить безопасность той или иной схемы движения судов по выбранной метрике. Вместе с тем на акваториях помимо регулярных судопотоков может иметь место и нерегулярный трафик (прибрежный лов, прогулочные катера и яхты и т. п.), характеризующийся хаотичностью траекторий. В некоторых случаях такой нерегулярный трафик может давать существенный вклад в метрики оценки опасности [12, 13]. Моделирование таких, хаотично движущихся по акватории, судов может осуществляться в рамках рассмотренного подхода посредством задания множества зон входа на акваторию и выхода с акватории и формирования случайной конфигурации судопотоков, их соединяющих. При этом число таких «нерегулярных» судопотоков должно быть достаточно велико, а интенсивность движения по ним судов должна быть низкой. Вопросам моделирования нерегулярного трафика и его влияния на суда, движущиеся в регулярных судопотоках, авторы планируют посвятить отдельное исследование.

Существуют математические модели, описывающие напряжённость плавания в том или ином районе: общую вероятность встречи судов в районе, вероятность встречи, нормализованную по времени или расстоянию плавания, частоту (или интенсивность) встреч. Например, модель, приведённая в работе [14] описывается в терминах вероятностей случайных величин, описывающих параметры судопотоков. Аналитическое представление функциональных зависимостей модели напряжённости плавания [14] представляет собой хоть и разрешимую, но довольно сложную задачу; для оценки безопасности той или иной акватории по этой модели прибегают к численному моделированию или приближённым численным методам интегрирования. Недостатком всех таких моделей является то, что они хорошо описывают сравнительно большие районы плавания (несколько десятков и сотни миль), когда можно пренебречь линейными размерами судов.

Общей особенностью задач имитационного моделирования является необходимость верификации и валидации получаемых результатов [15]. В рассматриваемой задаче такая верификация возможна путём соотнесения результатов моделирования с априорной оценкой метрик опасности движения, получаемых на основе представления акватории множеством примитивов [10]. Подчеркнём, что корректно сравнивать в этом случае можно будет не количественную оценку метрик, а качественную картину их распределения по акватории. Определённый вклад в верификацию результатов моделирования может дать оценка метрик при их подсчёте «с возвращением», как на рис. 3. Валидация результатов моделирования осуществляется путём экспертной оценки вариантов схем движения на предмет возможности их использования в реальных условиях мореплавания.

### Заключение

В статье рассматривается задача планирования схем безопасного движения судов. Перспективным путём решения задачи является построение схемы из примитивов движения и оценка её опасности по выбранной метрике (метрикам) путём имитационного моделирования. В работе предложен вариант такой имитационной модели коллективного движения судов на выбранной акватории.

Результаты проведённого исследования дают представление о характерных особенностях имитационной модели. Она позволяет оценить значения выбранных метрик опасности как для акватории в целом, так и «увидеть» наиболее нагруженные и опасные участки, требующие повышенного внимания со стороны судоводителей и береговых служб. Моделируя трафик акватории согласно той или иной схеме движения и соотнося полученные результаты, можно выбрать наиболее подходящую схему их возможных.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенного множества параметров модели, определяющих лишь кинематические свойства движения судов и не учитывающих явно динамику и особенности их движения в водной среде, в целом достаточно для информативного решения задачи.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка алгоритмов автоматического расхождения судов в соответствии с МППСС-72, оценка их эффективности и безопасности».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // *Journal of Navigation*. – 2009. – Vol. 62. – № 3. – P. 455–476.
2. Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. – 2016. – № 2. – С. 183–190.
3. Артемьев А. В., Яковенко Е. А., Оськин Д. А. Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 4–3. – С. 76–85.
4. Лентарёв А. А. Проблемы организации движения судов в дальневосточных водах // *Транспортное дело России*. – 2015. – № 6. – С. 256–257.
5. Таратынов В. П. Судовождение в стесненных районах. М.: Транспорт, 1980. – 128 с.
6. Гриняк В. М., Иваненко Ю. С. Использование данных АИС для оценки опасности коллективного движения на морской акватории // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2017. – № 3(18). – С. 18.
7. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Иваненко Ю. С. Оценка опасности движения на акватории по данным автоматической идентификационной системы // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2017. – № 10. – С. 41–46.
8. Гриняк В. М., Иваненко Ю. С., Люлько В. И., Шульгина А. В., Шурыгин А. В. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8. – № 1(28).
9. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шульгина А. В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 640–651.
10. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шульгина А. В. Моделирование схемы безопасного движения морской акватории // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – № 3–1(53). – С. 127–134.
11. Гриняк В. М., Шульгина А. В. Программа для имитационного моделирования движения судов на морских акваториях. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680994 Российская Федерация. Заявл. 26.10.2022. Опубл. 09.11.2022.
12. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network // *Journal of Navigation*. – 2019. – Vol. 72. – № 4. – P. 894–916.

13. Shi Y., Long C., Yang X., Deng M. Abnormal Ship Behavior Detection Based on AIS Data // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 9. – P. 4635.
14. Лентарёв А. А. Основы теории управления движением судов. Монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т., 2019. – 196 с.
15. Сальников А. В., Французов М. С., Виноградов К. А., Пятунин К. Р., Никулин А. С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9(750). – С. 100–115.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*ГРИНЯК Виктор Михайлович*, профессор Владивостокского государственного университета, доктор технических наук, e-mail: viktor.grinyak@vvsu.ru.

*Victor M. GRINYAK*, Professor of Vladivostok State University, Doctor of Sciences, e-mail: viktor.grinyak@vvsu.ru.

*ШУЛЕНИНА Алена Викторовна*, младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН, e-mail: shuleninaav@mail.ru.

*Alena V. SHULENINA*, Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, e-mail: shuleninaav@mail.ru.

*БАБИЕВ Илья Владимирович*, студент Владивостокского государственного университета, e-mail: babiyeviv@vvsu.ru.

*Ilya V. BABIYEV*, Student of Vladivostok State University, e-mail: babiyeviv@vvsu.ru.

*АРТЕМЬЕВ Андрей Владимирович*, доцент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, кандидат технических наук, e-mail: artemyevav@msun.ru.

*Andrey V. ARTEMIEV*, Assistant Professor of Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy, Candidate of Sciences, e-mail: artemyevav@msun.ru.

**МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТИ ПЕТРИ**

**Лоскутов А. И., Клыков В. А., Столяров А. В., Перельгин Ю. В.**

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

*Аннотация.* В статье представлен подход к построению модели функционирования бортовой аппаратуры сложных технических систем на основе ее логико-функционального описания с использованием сети Петри. Представлены результаты имитационного моделирования работы бортовой аппаратуры.

*Ключевые слова:* сложные технические системы, бортовая радиоэлектронная аппаратура, математические модели, идентификация, сети Петри.

*Для цитирования:* Лоскутов А. И., Клыков В. А., Столяров А. В., Перельгин Ю. В. Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры сложных технических систем на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети петри // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 27–39.

**MODEL OF FUNCTIONING OF ON-BOARD RADIOELECTRONIC EQUIPMENT  
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS BASED ON LOGICAL-FUNCTIONAL  
DESCRIPTION OF INTERACTING ELEMENTS USING PETRI NET**

**Loskutov A. I., Klykov V. A., Stolyarov A. V., Perelygin Yu. V.**

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg.

*Abstract.* The article presents an approach to constructing a model of the functioning of onboard equipment of complex technical systems based on its logical and functional description using Petri net. The results of simulation modeling of the operation of onboard equipment are presented.

*Keywords:* complex technical systems, on-board radio-electronic equipment, mathematical models, identification, Petri nets.

*For citation:* Loskutov A. I., Klykov V. A., Stolyarov A. V., Perelygin Yu. V. Model of Functioning of on-Board Radioelectronic Equipment of Complex Technical Systems Based on Logical-Functional Description of Interacting Elements Using Petri Net // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 27–39.

## **Введение**

Стремительное развитие научно-технического прогресса определяет направление прикладных исследований во всех областях человеческой деятельности. Получение практических результатов в данном случае недостаточно при использовании только эвристических подходов в ходе проведения исследований. Так, например, разработка алгоритма контроля бортовой аппаратуры (БА) различных объектов не может быть реализована на интуитивном уровне. Требуется более строгий, формализованный подход к решению данной задачи.

С развитием системного анализа и системотехники получение результатов решения прикладных задач в различных областях стало возможным на основе решения



задач идентификации. Из литературы [1] известно, что под идентификацией понимается процесс построения математической модели. Таким образом, моделирование процессов в рассматриваемой предметной области является первичным по отношению к разрабатываемым алгоритмам, методикам в рамках решаемых прикладных задач. Решение задачи идентификации должно быть прежде всего направлено на достижение цели исследования, т. е. математический аппарат, структура модели, ее размерность, «сложность» будут определять возможность решения прикладной задачи. Данный факт обусловлен тем, что избыточность при математическом моделировании зачастую нецелесообразна при прикладном характере проводимых исследований, что, определяет диалектический подход при решении задачи идентификации.

В настоящее время наблюдается взрывной рост проводимых исследований в области разработки сложных технических систем (СТС) различного назначения [2]. В рамках данных исследований не менее актуальными становятся вопросы, связанные с решением задачи идентификации. В статье предложен подход к математическому моделированию на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов рассматриваемой системы с использованием сети Петри для решения диагностических задач.

### **Постановка задачи**

Как было отмечено ранее, построение адекватной математической модели является ключевым вопросом при проведении различных исследований. При этом выбор математического инструмента для решения задачи идентификации определяется конечной целью проводимых прикладных исследований. Так, например, решение диагностических задач в общем случае подразумевает использование математических моделей, описывающих с формальной точки зрения стационарные дискретные динамические системы, что сужает класс применяемых моделей для решения задачи идентификации.

В настоящее время, разрабатывается и создается большое количество автоматических СТС, имеющих в своем составе множество БА, уровень развития которой постоянно совершенствуется, создается новая, высокотехнологичная БА. Исходя из этого возникает необходимость решения в том числе и диагностических задач при функционировании СТС в целом. Необходимо отметить, что наиболее распространенным элементом СТС является бортовая радиоэлектронная аппаратура (БРЭА), алгоритмы контроля которой должны быть основаны на математическом моделировании процессов ее функционирования.

Постановка задачи разработки модели функционирования БРЭА СТС представлена следующим образом.

Дано:

1 Модель функционирования БРЭА СТС (*Verb*), представленная в вербальном (неформализованном) виде. Данная модель может быть представлена в виде набора конструкторской документации.

2 Математический инструмент (*I*) для формализации процесса функционирования БРЭА СТС. Как было отмечено ранее, класс инструментов для проведения идентификации будет определяться задачей проводимых прикладных исследований.

3 Показатель  $\gamma$ , характеризующий степень близости построенной модели и реального объекта (БРЭА СТС).

Требуется разработать модель  $M_{\text{БРЭА}}$  с использованием математического инструмента  $I$  на основе вербального описания процесса функционирования БРЭА (*Verb*) так, чтобы показатель  $\gamma$  имел минимальные значения.

С формальной точки зрения данная постановка задача может быть представлена следующим образом:

$$M_{\text{БРЭА}}(I(\text{Verb})): \gamma \rightarrow \min. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что в литературе [1] показатель  $\gamma$  определен как показатель близости или показатель качества идентификации, однако могут использоваться и другие термины [3]: функция потерь, функция невязки, показатель адекватности модели реальному объекту.

В свою очередь, при описании стационарных дискретных динамических систем, в контексте системного анализа, математический аппарат может быть представлен выражением вида:

$$I = \langle B, G \rangle, \quad (2)$$

где  $B = b_i, i = \overline{1, n}$  – набор базисных множеств, которые участвуют при формализации процессов функционирования БРЭА;

$G = g_j, j = \overline{1, m}$  – набор отношений над базисными множествами, которые участвуют при формализации процессов функционирования БРЭА.

Отметим, что построение математической модели  $M_{\text{БРЭА}}$  зачастую имеет эвристический характер, однако это не всегда оказывается достаточным в плане получения достоверных результатов и часто зависит от квалификации исследователя. Вместе с тем задачу идентификации можно решать более строго. Так, на этапе получения исходных данных для решения задачи математического моделирования исследователь может предварительно осуществить логико-функциональный разбор работы подсистем БРЭА СТС. Другими словами, прежде чем приступить к решению задачи идентификации на основе инструмента (2), необходимо определить функциональную *Func* и логическую *Log* структуру взаимодействия подсистем БРЭА СТС. Данная процедура заключается в построении следующих отображений:

$$\alpha: \text{Verb} \rightarrow \text{Func}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – отображение, формализующее процесс определения функциональной структуры БРЭА на основе вербальной модели *Verb*.

$$\beta: \text{Verb} \rightarrow \text{Log}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – отображение, формализующее процесс определения логической структуры БРЭА на основе вербальной модели *Verb*.

В общем случае определение логики работы БА происходит с учетом функционального описания БРЭА. Функциональная и логическая структура, с математической точки зрения, может быть представлена в виде набора соответствующих элементов и отношений, заданных на множестве данных элементов. Так, например, функциональная структура включает в свой состав множество функциональных элементов БРЭА  $R = r_k, k=\overline{1, s}$  и линий связи  $H = h_g, g=\overline{1, h}$  между ними. Логическая структура включает множество команд управления  $K = k_f, f=\overline{1, g}$ , параметров  $S = s_t, t=\overline{1, z}$  работы БРЭА, а также взаимосвязи между ними  $V = v_j, j=\overline{1, h}$ . Необходимо отметить, что логическая структура описана в данной статье с позиции системного анализа и не включает в свой состав привычные в теории математической логики понятия пропозициональных переменных, формул и т. д. Данная трактовка позволяет подчеркнуть этапы подготовки исходных данных для решения задачи идентификации.

Исходя из вышеизложенного, на рис. 1 представлена схема построения математической модели на основе отображений (3) и (4).

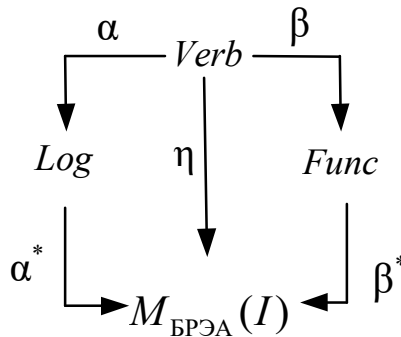


Рис. 1. Схема решения задачи идентификации (объяснения – в тексте)

Схема идентификации, изображенная на рис. 1, представляет собой коммутативную диаграмму, где отображение  $\eta$ , характеризующее решение задачи идентификации БРЭА СТС на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов, представляется композицией отображений:

$$\eta = (\alpha \circ \beta) \wedge (\alpha^* \circ \beta^*), \tag{5}$$

где  $\alpha^*$  – отображение, формализующее процесс интерпретации элементов функциональной структуры элементами математического аппарата (2);

$\beta^*$  – отображение, формализующее процесс интерпретации элементов логической структуры элементами математического аппарата (2).

Символ « $\wedge$ » обозначает последовательную совокупность композиций представленных отображений. Выполняя задачу идентификации с достаточным (оптимальным) уровнем для прикладных исследований, а также с учетом изложенного выше, можно скорректировать постановку задачи (1) следующим способом:

$$Verb \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Log = \langle K, S, V \rangle; \\ Func = \langle R, H \rangle; \\ I = \langle B, G \rangle. \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha: Verb \rightarrow Func; \\ \beta: Verb \rightarrow Log; \\ \eta = (\alpha \circ \beta) \vee (\alpha^* \circ \beta^*); \\ M_{BA}(\eta_I(L, F)): \gamma \rightarrow opt \Big|_{R \leq R_{зад}}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $R$  – ресурсные ограничения при решении задачи идентификации, которые не должны превышать значения  $R_{зад}$ .

Несмотря на уточнение, представленная постановка задачи (6) имеет все еще обобщенный характер. Напомним, что выбор определенного математического аппарата зависит от решаемой метазадачи. В работе приведен пример построения математической модели в рамках синтеза алгоритмов контроля технического состояния с использованием сети Петри.

**Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры сложных технических систем на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри**

Как было отмечено ранее, представление БРЭА СТС в качестве дискретно-событийной системы позволяет использовать определенный класс математических инструментов. В данном случае сети Петри являются удобным математическим аппаратом для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем, они могут использоваться для эффективного моделирования различных технологических процессов. Анализ моделей систем, выраженных в терминах сетей Петри, позволяет на ранних этапах проектирования оценить корректность алгоритмов взаимодействия как отдельных подсистем БРЭА СТС, так и работу всей системы в целом.

В общем случае сеть Петри может быть представлена следующей математической конструкцией [4, 5]:

$$C = \langle P, T, M, I, O \rangle, \quad (7)$$

где  $P = p_s, s = \overline{1, l}$  – конечное множество позиций динамической систем, определяющих структуру модели;

$T = t_d, d = \overline{1, k}$  – конечное множество переходов, определяющих структуру модели;

$I$  – является входной функцией, представляющей собой отображение вида  $I: T \rightarrow P$ ;

$O$  – является входной функцией, представляющей собой отображение вида  $O: P \rightarrow T$ ;

$M$  – разметка сети, определяющая динамику работы стационарной дискретной динамической системы.

В свою очередь, представление работы БРЭА СТС на основе аппарата сетей Петри подразумевает интерпретацию элементов функциональных и логических

структур элементами математической конструкции (7) на основе применения отображений  $\alpha^*$  и  $\beta^*$ .

Общая методика построения математической модели БРЭА СТС на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов может быть представлена следующим образом.

1. Определение функциональных элементов  $R=r_k, k=\overline{1,s}$  в БРЭА СТС исходя из вербального описания *Verb*.
2. Определение схемы взаимодействия  $H=h_g, g=\overline{1,h}$  между функциональными элементами  $R=r_k, k=\overline{1,s}$  исходя из вербального описания *Verb*.
3. Построение функциональной структуры (3) в соответствии с оператором  $\beta$ .
4. Определение управляющих воздействий (команд управления  $K=k_f, f=\overline{1,g}$ ) относительно функциональной структуры *Func*.
5. Определение параметров работы БРЭА СТС  $S=s_t, t=\overline{1,z}$  относительно функциональной структуры *Func*.
6. Построение логической структуры (4) в соответствии с оператором  $\alpha$ .
7. Интерпретация элементов функциональной *Func* и логической структуры *Log* элементами математического аппарата сетей Петри.

Данная интерпретация с точки зрения решения задачи идентификации заключается в реализации двух основных этапов. Первый этап заключается в структурной идентификации, а именно в построении структуры модели на основе аппарата сетей Петри [3]. Его реализация происходит на основе построения функциональной структуры *Func*. Так, например, функциональные элементы  $r_k, k=\overline{1,s}$  могут быть интерпретированы как переходы  $t_d, d=\overline{1,k}$ . Второй этап заключается в определении параметров модели и описании ее динамики. Он носит название параметрической идентификации [1]. Реализация его происходит на основе построения логической структуры *Log*. Поясним данное утверждение отдельно. Так изменение вектора разметки  $M$ , характеризующего изменение динамической системы, в пространстве состояний будет происходить на основе интерпретации команд управления  $k_f, f=\overline{1,g}$  и параметров  $s_t, t=\overline{1,z}$ .

Рассмотрим реализацию модели функционирования БРЭА СТС на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри.

В качестве примера исследована система управления движением (СУД) малого космического аппарата (МКА) АИСТ-2Д [6]. Данный МКА решает широкий спектр задач, связанных как с проведением различных экспериментов, так и с обработкой информации дистанционного зондирования земли с высоким разрешением и увеличенной полосой захвата. При этом система управления движением (СУД) МКА представляет собой законченную автономную систему с минимальным количеством внешних информационно-управляющих связей. В соответствии с назначением СУД выполняет следующие основные функциональные задачи [6]:

– гашение угловых скоростей после отделения МКА и при повторных приведениях изделия в ориентированное положение;

- приведение МКА в одноосную солнечную ориентацию (панели солнечных батарей ориентированы на Солнце);
- приведение МКА в ориентированное в орбитальной системе координат (ОСК) или гармонической орбитальной системе координат (ГОСК) системе координат положение;
- осуществление программных поворотов для быстрого перевода МКА из солнечной ориентации в ориентацию в ГОСК (ОСК) и обратно;
- сбор и формирование телеметрической информации (программной и схемной) о своем функционировании и процессах ориентации МКА для последующей передачи по шине CAN в бортовую систему контроля и управления (БСКУ) или высокоскоростную радиолинию для передачи на Землю;
- контроль функционирования СУД. В случае выявления сбоев в работе осуществление перезапуска СУД с резервными комплектами отказавшей БА, а в случае невозможности такого перезапуска – отключение СУД и выдачи соответствующей информации в БСКУ.

В общем случае СУД МКА является СТС, содержащей в своем составе, в том числе, и БРЭА. В состав СУД входит БА, которая подразделяется на чувствительные элементы, исполнительные органы и усилительно-преобразующие устройства, а также программное обеспечение СУД, размещаемое в универсальной многофункциональной вычислительной системе (УМВС) и реализующее алгоритмы работы СУД. УМВС построена по принципу резервированного устройства. Для информационного обмена базового модуля УМВС с бортовой аппаратурой СУД используется многофункциональный канал обмена ГОСТ Р52070-2003.

СУД МКА состоит из следующих приборов: МА – магнитометр аналоговый; ОИУС – одноосный измеритель угловой скорости; ПОЗ – прибор ориентации по Земле; ОСД – оптический солнечный датчик; мБОКЗ – мини-блок определения координат звезд; ОГ – оптическая головка; БОД – блок обработки данных; ЭМ – электромагнит; УМВС – универсальная многофункциональная вычислительная система; КУДМ – комплекс управляющих двигателей-маховиков.

Описание логической структуры СУД представлено схемой на рис. 2.

Логическая структура представляет собой схему взаимодействия между чувствительными и исполнительными элементами на основе реализации алгоритмического обеспечения УМВС. Так, например, каждый прибор мБОКЗ формирует и передает по запросу в УМВС информацию об угловом положении приборной системы координат (ПСК), связанной с посадочным местом соответствующей оптической головки, относительно инерциальной геоцентрической системы координат (ИСК) текущей эпохи. Информация выдается в виде кватернионов, преобразующих единичные векторы базиса ИСК в единичные векторы базиса ПСК ( $\Lambda_{ПСКi}^{ИСК}$ ). Далее алгоритм определения ориентации КА по информации мБОКЗ производит расчет ориентации связанной системы координат относительно ИСК текущей эпохи по измерениям мБОКЗ.

На рис. 2 введены следующие обозначения: ВОГ – волоконно-оптический гироскоп; ПУУД – программа управления угловым движением; ССК – связанная система координат; ДМ – двигатель-маховик; МИО – магнитно-исполнительные органы; ЭП – электроприбор управления исполнительными элементами;  $\Lambda_{пр}$  – кватернион программного положения;  $\Lambda_{ор}$  – кватернион ориентации;  $\omega$  – проекции

вектора абсолютной угловой скорости изделия на оси  $OX_{ССК}$ ,  $OY_{ССК}$ ,  $OZ_{ССК}$ . Другие обозначения были упомянуты выше.

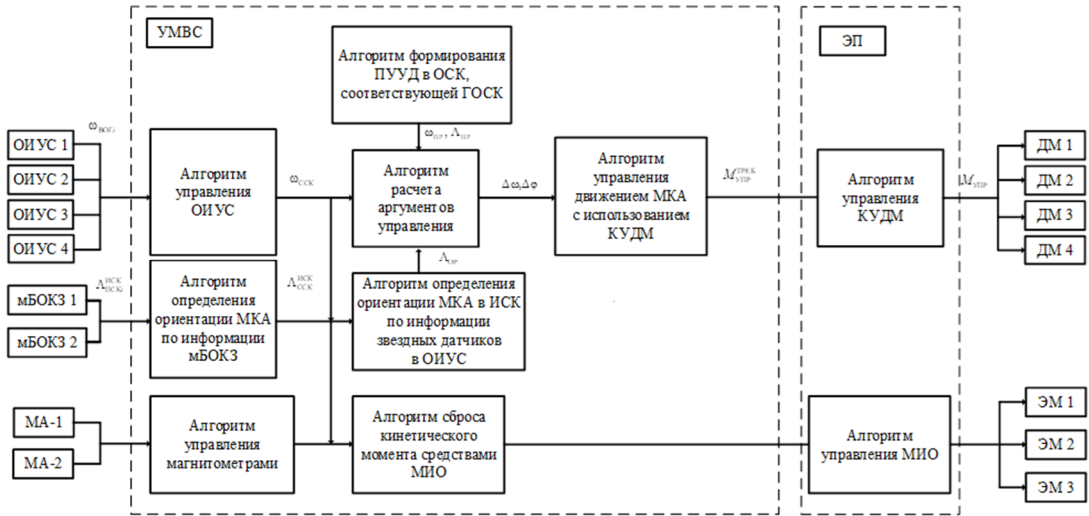


Рис. 2. Обобщенная логическая структура системы управления движением малого космического аппарата

Исходя из анализа функционального описания и логической структуры, приведенной на рис. 2, а также описания работы СУД МКА [6] построена обобщенная математическая модель процесса функционирования СУД на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри (рис. 3).

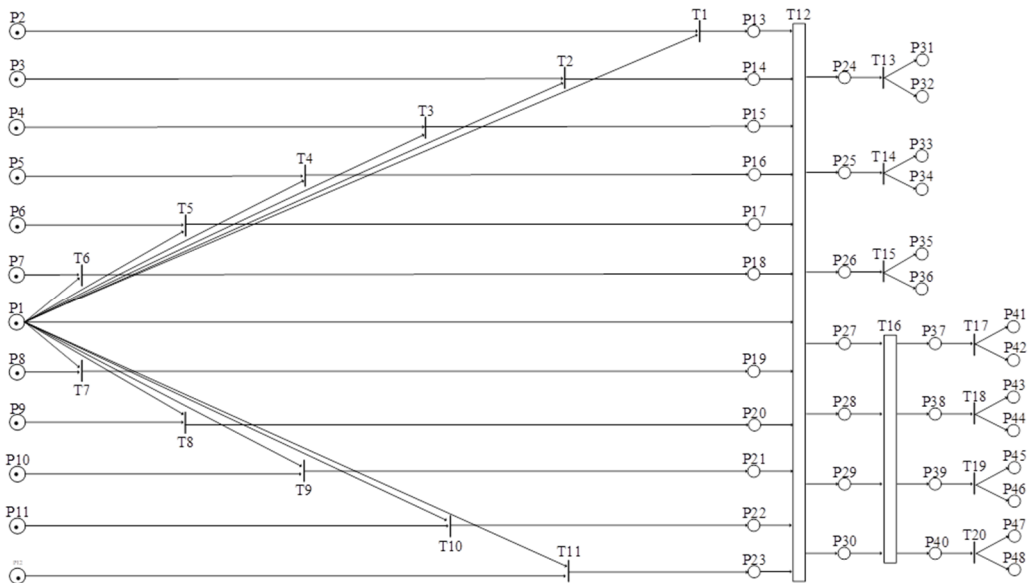


Рис. 3. Модель функционирования СУД МКА на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри

Модель функционирования СУД МКА на рис. 3 представляет собой двудольный ориентированный мультиграф, состоящий из вершин двух типов, а именно позиций (Р) и переходов (Т), соединенных между собой дугами. Семантическая нагрузка данных элементов модели, следующая: Р1 – подача питания; Р2-Р12 – измеряемые параметры; Р13-Р23 – показания датчиков; Р24-Р26 – подача питания на электромагнит; Р27-Р30 – команды на включение ДМ; Р31-Р36, Р41-Р48 – результат коррекции (норм (нечет), не норм (чет)); Р37-Р40 – подача питания на ДМ; Т1, Т2 – преобразование измеряемого магнитного поля вокруг КА в магнитометре аналоговом в сигнал; Т3-Т4 – определение направления Земли относительно КА в приборах ориентации по Земле, преобразование в сигнал; Т5-Т6 – определение направления Солнца относительно КА в оптических солнечных датчиках, преобразование в сигнал; Т7-Т10 – преобразования угловой скорости КА ОИУС в сигнал; Т11 – определение направления звёзд относительно КА в МБОКЗ, преобразование в сигнал; Т12 – обработка сигналов датчиков, выдача команд управления на исполнительные механизмы УМВС; Т13-Т15 – осуществление гашения угловых скоростей КА с помощью электромагнитов; Т16 – управление роторами ДМ электроприбором; Т17-Т20 – ориентация КА с помощью ДМ.

Необходимо отметить, что, несмотря на то что представленная математическая модель СУД МКА имеет обобщенный характер, она позволяет решать определенные задачи, например, такие как распределение точек контроля при техническом диагностировании или определение элементов рассматриваемой системы с наиболее вероятными отказами. Полученные результаты соответствуют описанной выше постановке задачи (6), при которой отсутствует необходимость добиваться минимального значения (1) показателя  $\gamma$ . На основании полученной математической модели проведено имитационное моделирование процесса функционирования БРЭА СТС на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри.

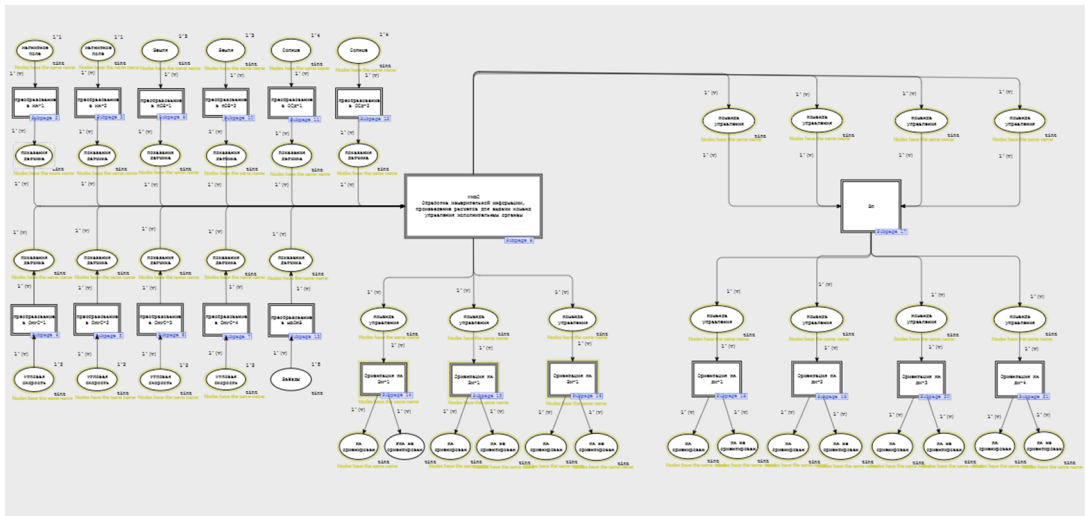
### Результаты имитационного моделирования

В настоящее время существует ряд пакетов, исследующих свойства сетей Петри. К ним, например, можно отнести MATLAB и AnyLogic. Однако стоит заметить, что работа в этих средах с сетями Петри возможна только с помощью сторонних библиотек.

Один из современных пакетов, моделирующих работу и проводящих анализ сетей Петри, является CPN IDE. Данное программное обеспечение является открытым и свободным [7–9]. CPN IDE используется в большом числе реальных проектов. Основными функциями CPN IDE являются: создание моделей сетей Петри, анализ их поведения с помощью имитации динамики сетей Петри, а также построение и анализ пространства состояний модели. Кроме того, продукт позволяет получить информацию о таких свойствах сетей Петри, как живость и ограниченность. CPN IDE позволяет проводить пошаговую имитацию для поиска и устранения ошибок в разрабатываемой модели, а также автоматическое выполнение определенного числа шагов.

Имитационная отработка математической модели СУД МКА, изображенной на рис. 3 и реализованной в ПО в CPN IDE, представлена на рис. 4.





**Рис. 4. Модель функционирования СУД МКА на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри, реализованная в CPN IDE**

Необходимо отметить, что в качестве исходных данных для проведения моделирования использованы вероятности безотказной работы элементов СУД.

В общем виде модель, изображенная на рис. 4, позволяет проводить имитационное моделирование процесса функционирования СУД МКА в различных режимах работы, а также в условиях возникновения отказов. Указанная модель с учетом исходных данных позволяет осуществлять набор статистических данных, необходимых для принятия соответствующих решений в области технического диагностирования, что значительно снижает различные затраты при выполнении практических задач. Количественная оценка полученных результатов может быть произведена на основе анализа временных затрат при синтезе программ контроля бортовой аппаратуры СУД МКА.

На рис. 5 представлен пример построения модели работы датчика с учетом значений вероятности безотказной работы. Модель датчика построена на 1000 циклов срабатывания датчика. Распределение вероятности осуществляется по нормальному закону. В данном случае вероятность безотказной работы составляет 0,997. На рис. 5 датчик сработал 154 раза, на 118 шаге показания датчика вышли за пределы нормы, произошел сбой.

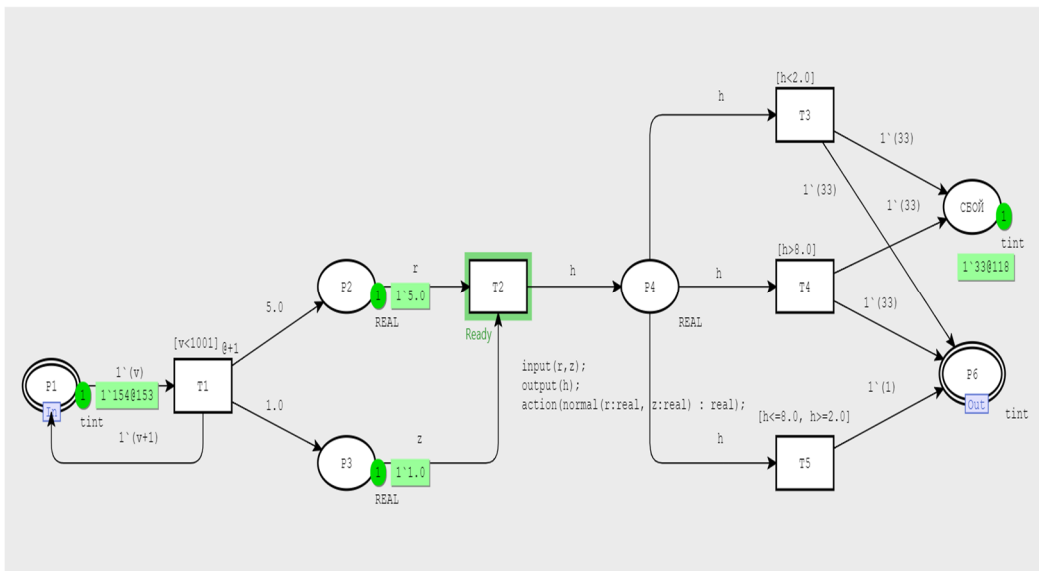


Рис. 5. Модель функционирования датчика СУД МКА

Также в ходе рассмотрения работы математической модели выявлены точки контроля, необходимые для достоверного и своевременного определения вида технического состояния как отдельных элементов системы, так и СУД МКА в целом. На рис. 6 представлены результаты по определению места контроля на примере работы УМВС рассматриваемого КА.

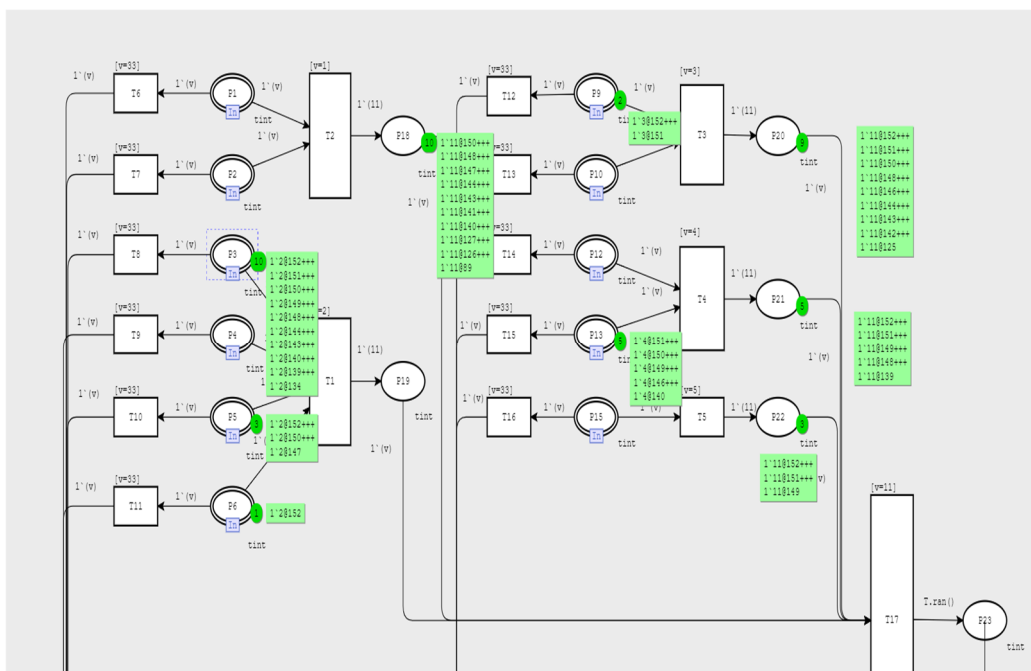


Рис. 6. Модель функционирования датчика СУД МКА с целью определения точки контроля

Выявленные в процессе имитационного моделирования точки контроля (рис. 6) позволяют скорректировать программу оценки вида технического состояния, сокращая время ее реализации в среднем на 15 %.

### **Заключение**

Исследование модели функционирования БРЭА СТС на основе логико-функционального описания взаимодействующих элементов с использованием сети Петри представляет собой актуальное и перспективное направление в области проектирования и анализа радиоэлектронных систем. Использование сети Петри позволяет учитывать множество параллельных процессов, взаимодействующих элементов и сложных зависимостей, что делает этот подход эффективным для моделирования и анализа СТС.

Таким образом, представленная модель функционирования БРЭА является важным инструментом для разработки современных и эффективных СТС. Дальнейшие исследования в данной области позволят улучшить качество и надежность работы БРЭА, а также повысить ее эффективность.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дмитриев А. К. Идентификация и техническая диагностика / М.: МО СССР, 1987. – 521 с.
2. Сделано у нас // Сделано у нас: [сайт]. – 2024. URL: <http://sdelanounas.ru> (дата обращения: 5.09.2024).
3. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография / В. В. Мышко, А. Н. Кравцов, Е. В. Копкин и др. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2013. – 303 с.
4. Веретельникова Е. Л. Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2018. – 82 с.
5. Котов В. Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
6. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». – Самара: изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
7. CPN TOOLS // CPN TOOLS: [сайт]. – 2024. – URL: <http://cpntools.org> (дата обращения : 5.09.2024).
8. Мезкин А. Л., Музылев Н. В. Инструменты компьютерного моделирования в учебном процессе технического университета // Математика. Информатика. Образование. – 2023. – № 4. – 29 с.
9. Шмелев В. В., Попов А. М. Алгоритм первичной обработки телеметрической информации с автоматизированной верификацией исходных данных и коррекцией ошибок // Информация и космос. – 2023. – № 3. – 53 с.

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*ЛОСКУТОВ Андрей Иванович*, начальник кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор технических наук, профессор, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*Andrey I. LOSKUTOV*, Head of the department of Telemetry systems, complex processing and information protection, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*КЛЫКОВ Владимир Алексеевич*, доцент кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*Vladimir A. KLYKOV*, Associate Professor of the department of Telemetry systems, complex processing and information protection, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Candidate of Technical Sciences, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*СТОЛЯРОВ Андрей Владимирович*, преподаватель кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*Andrey V. STOLYAROV*, Lecturer of the department of Telemetry systems, complex processing and information protection, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Candidate of Technical Sciences, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*ПЕРЕЛЫГИН Юрий Владимирович*, адъюнкт кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*Yuri V. PERELYGIN*, Adjunct of the department of Telemetry systems, complex processing and information protection A. F. Mozhaisky Military Space Academy, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

**ТЕСТИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО СЕРВИСА ВЫСОКОТОЧНОГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ HI-RTP™ КИТАЙСКОЙ КОМПАНИИ  
HI-TARGET**

**Смолин В. М.<sup>1</sup>, Решетняк С. В.<sup>1</sup>, Миляков Д. Ф.<sup>2</sup>, Онищенко О. Л.<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup>АО «Конструкторское бюро навигационных систем», г. Москва.

<sup>3</sup>ООО «НавГеоКом ДифСервис Групп», г. Москва.

*Аннотация.* В ранее опубликованной статье авторов были рассмотрены результаты тестирования PPP-сервиса компании АО «ГЛОНАСС». В настоящей работе рассматриваются результаты тестирования глобального сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTP™ компании Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd с использованием отечественной навигационной аппаратуры. PPP-сервис Hi-RTP™ является единственным доступным в настоящее время для использования в России международным сервисом высокоточного определения координат, который позволяет решить проблему ухода с российского рынка иностранных провайдеров аналогичных услуг из недружественных стран. Также приведены результаты параллельного тестирования работы независимого отечественного PPP-сервиса «Система высокоточного определения эфемеридно-временной информации».

*Ключевые слова:* глобальная навигационная спутниковая система ГНСС/GNSS, метод высокоточного определения координат точки PPP, PPP-AG с разрешением целочисленной неоднозначности, PPP-RTK, глобальный сервис высокоточного позиционирования Hi-RTP™, система высокоточного определения эфемеридно-временной информации СВО ЭВИ.

*Для цитирования:* Смолин В. М., Решетняк С. В., Миляков Д. Ф., Онищенко О. Л. Тестирование глобального сервиса высокоточного определения координат Hi-RTP™ китайской компании Hi-Target // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 40–74.

**TESTING THE GLOBAL HIGH-PRECISION POSITIONING SERVICE HI-RTP™  
OF THE CHINESE COMPANY HI-TARGET**

**Smolin V. M.<sup>1</sup>, Reshetnyak S. V.<sup>1</sup>, Milyakov D. F.<sup>2</sup>, Onishchenko O. L.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

<sup>2</sup>Design Bureau of Navigation Systems, JSC, Moscow

<sup>3</sup>Navgeokom Difservise Group LLC, Moscow

*Abstract.* A previously published article by the authors examined the testing results of the PPP service provided by JSC “GLONASS.” This article presents the results of testing the global high-precision positioning service Hi-RTP™ developed by Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd, using domestic navigation equipment. The Hi-RTP™ PPP service is currently the only international high-precision positioning service available for use in Russia, addressing the issue of the withdrawal of foreign providers of similar services from unfriendly countries. The article also provides results from parallel testing of the independent domestic PPP service “High-Precision Ephemeris and Time Information Determination System.”

*Keywords:* Global navigation satellite system GNSS, precise point positioning (PPP) method, PPP-AR with integer ambiguity resolution, PPP-RTK, Hi-RTP™ global high-precision positioning service, High-Precision Ephemeris and Time Information Determination System (SVO EVI).

*For citation:* Smolin V. M., Reshetnyak S. V., Milyakov D. F., Onishchenko O. L. Testing the Global High-Precision Positioning Service Hi-RTP™ of the Chinese Company Hi-Target // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 40–74.

## Введение

Перспективы внедрения в отечественной гидрографии беспилотных технологий с использованием малых автономных плавсредств, задачи геодезии, геодинамики, геомониторинга, кадастра, землеустройство, маркшейдерия, инженерные изыскания и пр. требуют координировать объекты с повышенной, и даже прецизионной точностью, и высокой достоверностью. Такой уровень точности в акватории морей вне зоны действия береговых RTK-сервисов УКВ диапазона не может быть обеспечен стандартными сервисами контрольно-корректирующих станций Глобальных навигационных спутниковых систем (ККС ГНСС) «ГЛОНАСС/GPS» и использованием российского функционального дополнения ГНСС – Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ). Более того, даже субметровые точности являются недостаточными для решения части специальных морских задач и динамических морских объектов, например, для обеспечения работы систем Динамического позиционирования судов по удержанию в точке бурения или на этапе причаливания к буровой платформе, при прокладке или ремонте подводных трубопроводов и кабелей и др. Для этих целей требуются точности координирования порядка 10 см RMS (*Root Mean Square* / средняя квадратичная ошибка).

Такие точности в акватории морей России до недавнего времени достигались за счёт подписки на услуги иностранных коммерческих сервисов, реализованных на основе метода высокоточного координирования или, в дословном переводе с английского, высокоточного определения координат точки – PPP / *Precise Point Positioning*, который в российской специальной литературе также называют методом высокоточного автономного (или абсолютного) позиционирования (далее – PPP), разработку и активное внедрение которого можно назвать одной из наиболее значимых инноваций в области развития и применения технологий ГНСС в последние десятилетия. Однако после введения санкционных ограничений международные компании из недружественных стран, такие как Veripos, Oceaneering, Fugro и др., широко предоставлявшие в России до 2022 г. услуги PPP-сервисов различных видов, прекратили оказание этих услуг [1].

Единственной международной компанией, официально оказывающей в настоящее время аналогичные услуги в России, является компания «Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd. URL» (далее – Hi-Target), предоставляющая глобальный PPP-сервис высокоточного позиционирования Hi-RTP™ собственной разработки. Штаб-квартира компании находится в Гуанчжоу, КНР. В настоящей статье описаны основные характеристики сервиса Hi-RTP™ и рассмотрены ход и результаты тестирования PPP-сервиса Hi-RTP™ с использованием мульти-системного приёмника ГНСС «EFT S2» производства российской компании ООО «ЕФТ Сервис», г. Москва. Также приводятся результаты параллельного тестирования работы независимого PPP-сервиса «Система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации СВО ЭВИ», г. Москва, с использованием отечественного приёмника ГНСС «Аппаратура ПС», разработанного АО «Конструкторское бюро навигационных систем» (далее – АО «КБ НАВИС»), организованного на заключительном этапе тестирования для оценки влияния уровня корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервиса Hi-RTP™ и точность получаемых результатов. Для обеспечения одинаковых условий для спутниковых наблюдений приёмник «Аппаратура ПС» с совмещенной антенной был установлен на расстоянии

порядка 1 м в плане от центра основного опорного пункта, на котором была закреплена антенна приёмника «EFT S2».

### 1. Глобальный PPP-сервис высокоточного позиционирования компании Hi-Target - Hi-RTPTM

Разработанный международной компанией «Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd.», штаб-квартира которой находится в Гуанчжоу, КНР, Глобальный PPP-сервис высокоточного позиционирования в режиме реального времени или, на английском языке, - *Hi-Target Real Time Precision Positioning Service System* (далее – Hi-RTPTM), был запущен в 2019 году. Основанная в 1999 году, компания Hi-Target является ведущим брендом высокоточных геодезических и картографических приборов, геодезических и инженерных решений, мобильных ГИС, решений для гидрографической съемки, мониторинга, управления машинами, решений для точного земледелия и услуги по корректировке данных. Компания Hi-Target насчитывает около 2000 сотрудников по всему миру, имеет сеть из 11 операционных центров и более 700 партнеров в более чем 100 странах и регионах [2]. О старте работы Hi-RTPTM на 10-й Китайской конференции по спутниковой навигации совместно объявили руководители ГНСС БейДу/Compass и группы компаний Hi-Target, заявившие при этом об обеспечении десятисантиметрового уровня точности в плане (горизонтальной плоскости) в регионах за пределами Азиатско-Тихоокеанского региона на основе данных с 20 контрольных станций за 26 дней. Вертикальная точность при этом составила около 15 см, а время сходимости – менее 25 минут [3].

Сервис Hi-RTPTM – это спутниковый дифференциальный сервис высокоточного определения местоположения с расширенными возможностями и глобальным охватом. Hi-RTPTM предлагает не только технологии PPP-Float и PPP-AR с целочисленным разрешением неоднозначности, но и технологию PPP с разрешением неоднозначности в реальном режиме времени – AR-RT-PPP / *Ambiguity-Resolved Real-Time PPP*, которую также называют PPP-RTK [4]. Метод PPP-RTK активно обсуждается и изучается в мире в последние годы и является самым современным в сообществе высокоточных систем позиционирования ГНСС. Эта технология потенциально позволяет предложить жизнеспособную альтернативу кинематическому позиционированию в реальном времени RTK, что обеспечивается локальными или региональными сетями непрерывно работающих опорных станций CORS / *Continuously Operating Reference Stations* [5].

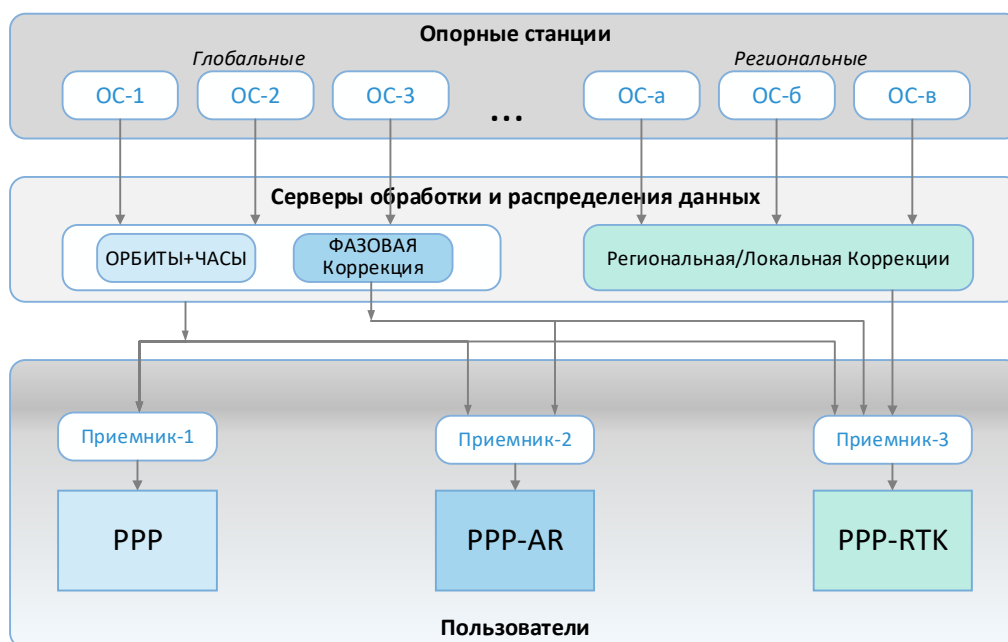
Методы высокоточного позиционирования PPP-Float, PPP-AR и PPP-RTK отличаются видом компенсации ошибок с различными временными и пространственными характеристиками, связанными с ошибками спутникового сигнала в пространстве (*SIS*), такими как орбита, синхронизация и смещение кода сигнала, некалиброванная задержка фазы/*Uncalibrated Phase Delay* (UPD) и атмосферные задержки, включающие региональные или локальные тропосферные и ионосферные задержки, а также ошибки приёмника, такие как многолучевость и смещение приёмника (код и фаза). Различные коррекции, требуемые для PPP, PPP-AR и PPP-RTK, приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Виды коррекций для методов высокоточного позиционирования PPP, PPP-AR и PPP-RTK [6]**

| Виды Коррекции            | PPP | PPP-AR | PPP-RTK |
|---------------------------|-----|--------|---------|
| Орбиты                    | ✓   | ✓      | ✓       |
| Часы                      | ✓   | ✓      | ✓       |
| Смещение Кода             | ✓   | ✓      | ✓       |
| Смещение Фазы UPD         |     | ✓      | ✓       |
| Ионосферная задержка STEC |     |        | ✓       |
| Тропосферная задержка     |     |        | ✓       |

Погрешности спутниковых орбит, часов и смещение кода, вызванное групповой задержкой для каждого спутникового сигнала, предоставляются PPP для исправления ошибки SIS. Смещение фазы каждого спутникового сигнала, вызванное коррекцией фазы и часов, дополнительно предоставляются PPP-AR для устранения неоднозначности. Атмосферные поправки, включая STEC (*Slant Total Electron Content*/общее наклонное содержание электронов) и тропосферную задержку, предоставляют PPP-RTK для обеспечения более быстрой сходимости [6, с. 5].

Блок-схема функционирования методов высокоточного позиционирования PPP, PPP-AR и PPP-RTK приведена на рис. 1.



**Рис. 1. Блок-схема функционирования методов PPP, PPP-AR и PPP-RTK**

Как видно из рис. 1, коррекция фазовых смещений спутников (UPD) прокладывает путь к разрешению целочисленной неоднозначности для конкретного приемника, при этом ускоряя процесс схождения. А при учёте дополнительной коррекции атмосферных задержек, оцененных в региональной сети, возможно позиционирование, подобное RTK [7, 8].



Сервис Hi-RTP™ использует глобальную сеть мультисистемных опорных станций ГНСС и передовые алгоритмы для определения высокоточной орбиты спутников ГНСС, смещений часов и других системных параметров. Эта информация позволяет Hi-RTP™ предоставлять приемникам услуги коррекции с точностью до субметра, дециметра или сантиметра. Корректирующие поправки передаются в режиме реального времени по всему миру с минимальной задержкой через спутники ГНСС БЕЙДОУ в *L*-диапазоне и/или по сети интернет. Кроме сети наземных опорных станций Hi-Target CORS/*Continuously Operating Reference Stations*, система Hi-RTP™ включает Центр обработки данных, наземную Станцию передачи данных, Спутник связи *L*-диапазона и пользовательский терминал [9]. Внешний вид наземных опорных станций Hi-Target CORS приведён на рис. 2 и 3.

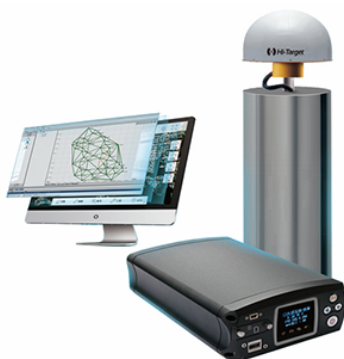


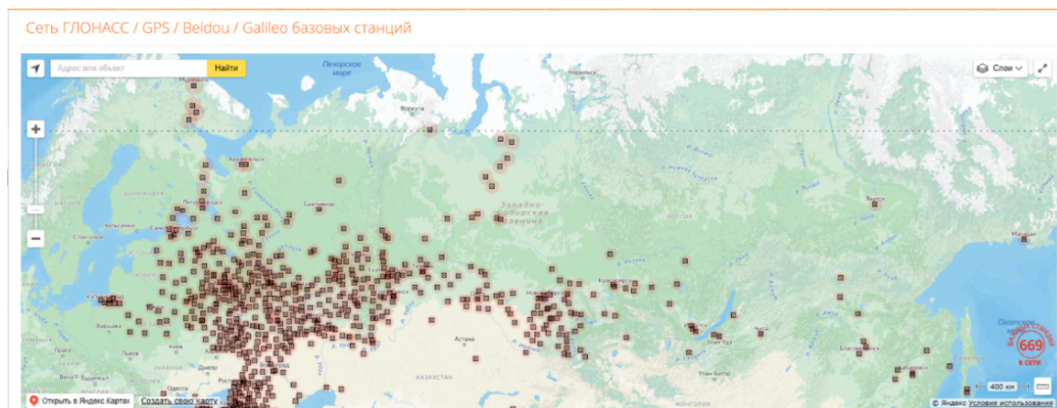
Рис. 2. Состав оборудования наземной опорной станция Hi-Target CORS (рис. из [2]).

Опорная станция Hi-Target CORS – это высокоинтегрированная измерительная система, включающая сетевой эталонный референсный приемник ГНСС, специальную 3D кольцевую антенну, программное обеспечение для обработки и распространения данных, а также техническую поддержку, сочетающую передовые и традиционные технологии ГНСС для обеспечения комплексного решения по сбору, обработке, распространению данных и управлению данными [9].



Рис. 3. Наземные опорные станции Hi-Target CORS, установленные в Камбодже (слева), Ливане (справаверху) и Мехико [2]

Hi-Target развернула значительное количество опорных станций CORS в различных странах мира, в том числе, на территории России. При этом общее число базовых станций в единой сети Hi-Target составляет порядка семисот станций, как указано в правом нижнем углу на рис. 4 [10].



**Рис. 4. Расположение опорных станций CORS компании Hi-Target на территории России и Белоруссии [10]**

Общий принцип функционирования высокоточного PPP-сервиса описан авторами в работе [11]. В нашем случае система PPP-сервиса Hi-RTP™, функционирует следующим образом.

- Сервис Hi-RTP использует эфемеридно-временную информацию (ЭВИ), формируемую международной службой ГНСС IGS, которая вычисляется по результатам спутниковых наблюдений, выполняемых международной сетью наземных постоянно действующих станций. Сообщения IGS SSR определяют коррекцию орбиты, коррекцию часов, смещение кода, смещение фазы UPD для каждой ГНСС на основе содержимого пунктов 1 и 2 RTCM SSR [12]. Сообщения идентифицируются в формате, совместимом с RTCM-3.

- Опорные станции сети Hi-Target CORS ведут непрерывные измерения параметров навигационных космических аппаратов (НКА) созвездий ГНСС ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и BEIDOU, находящихся в зоне видимости, и в режиме реального времени по каналам связи передают параметры спутников в Центр обработки данных (ЦОД).

- ЦОД выполняет математическую обработку полученных измерений, результатом которой являются уточнённая ЭВИ навигационных спутников, а также необходимая дополнительная корректирующая информация в виде SSR-сообщений, которые размещаются на серверных ресурсах.

- Зарегистрированный в системе Hi-RTP™ потребитель через систему доступа запрашивает и получает по сети интернет (в случае нашего тестирования) или по спутниковой связи SSR-информацию в формате RTCM версии 3.2 и выше.

- Выполняя одновременно измерения параметров НКА ГНСС (измерения кода и фазы несущей частоты), находящихся в зоне видимости, и комплексируя их с SSR-информацией, полученной по сети интернет, программное обеспечение навигационной аппаратуры потребителей (НАП) вычисляет координаты фазового центра антенны приёмника.

Необходимо подчеркнуть, что по состоянию на ноябрь 2024 года сервис Hi-RTPTM является единственным предоставляющим услуги в России официальным международным сервисом высокоточного определения координат, который после ухода с российского рынка в 2022 году компаний из недружественных стран позволил без ущерба требуемой точности сохранить возможность высокоточного позиционирования при выполнении работ в различных областях наземных, сельскохозяйственных, промышленных, строительных и морских применений. Сервис Hi-RTPTM на территории РФ и стран СНГ предоставляется пользователям по Договорам подписки на периоды 1, 3, 6 и 12 месяцев российскими компаниями «ЕФТ Групп/EFT Group» для наземных, геодезических, строительных и иных приложений и партнерской компанией «НавГеоКом ДифСервис Групп» для морских и речных приложений. Все подписки оплачиваются в российских рублях. Отметим, что сервис Hi-RTPTM используется на нескольких российских специализированных судах: краново-монтажном трубоукладочном судне «Академик Черский» (рис. 5) и судах снабжения «Остап Шеремет» и «Иван Сидоренко» (рис. 6).



**Рис. 5. Краново-монтажное трубоукладочное судно «Академик Черский»**  
(фото с ресурса fleetphoto.ru)



**Рис. 6. Суда снабжения «Остап Шеремет» и «Иван Сидоренко»**  
(фото с ресурса fleetphoto.ru)

На указанных судах с системами Динамического позиционирования используются мультисистемные приемники ГНСС «EFT S2 Dual Heading», подключенные к сервису Hi-RTPTM.

Поскольку Hi-RTPTM – это коммерческая система с закрытым форматом, важным конечным звеном является навигационная аппаратура потребителей, выдающая результирующее PPP-решение. Она должна иметь предустановленное программное обеспечение для работы с сервисом Hi-RTPTM. Авторам в настоящее время известна единственная производимая в России НАП, предназначенная для работы в системе глобального высокоточного позиционирования Hi-RTPTM. Такой НАП является многофункциональный ГНСС-приемник раздельной компоновки для решения специальных задач «EFT S2», который и был использован при выполнении тестирования.

## 2. Многофункциональный ГНСС-приемник «EFT S2»

Тестирование глобального PPP-сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTPTM выполнялось с использованием аппаратуры НАП «EFT S2» производства российской компании ООО «ЕФТ Сервис», г. Москва, Сертификат об утверждении типа средств измерений № 86602-22 (выдан Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии сроком до 31 августа 2027 г.). НАП «EFT S2» была предоставлена в распоряжение АО «ГНИНГИ» для использования в рамках тестирования по соответствующему договору компанией «EFT Group», специалисты которой оказали помощь в монтаже и запуске оборудования, а также техническую поддержку в ходе тестирования.

Приемник «EFT S2» представляет собой прибор раздельной компоновки, разработанный для решения задач высокоточного позиционирования. Внешний вид приёмника «EFT S2» приведен на рис. 7, а основные технические характеристики – в табл. 2 [13]. Передовая математика обработки сигналов тройной частоты созвездий ГНСС, примененная в НАП «EFT S2», обеспечивает надежное решение и высокую скорость позиционирования даже в условиях высотной застройки и сильной заселенности. 866 универсальных каналов не только позволяют EFT S2 принимать все существующие сигналы ГНСС, но и обеспечивают высокую актуальность прибора в будущем.



Рис. 7. Внешний вид ГНСС приёмника «EFT S2» [13]

Встроенный УКВ модем широкого диапазона (410-470 МГц) и мощностью 2 Вт позволяет без труда осуществлять работу в режиме RTK на объектах, где нет мобильного интернета. Модем работает как на прием, так и на передачу данных. Помимо УКВ модема прибор оснащен WiFi и Bluetooth. Web-интерфейс приемника дает возможность настраивать и запускать прибор дистанционно. Насколько бы быстро не обновлялся спутниковый сегмент, у S2 достаточно мощности поддерживать появляющиеся сигналы в течение всего срока службы. Приемник разработан для эксплуатации в условиях разнообразных климатических зон и обладает уровнем защиты и влаги IP68 и температурным диапазоном эксплуатации от – 45 °С до +65 °С. Подробно технические характеристики НАП «EFT S2» приведены в описании [13].

Помимо предустановленного ПО для работы, в системе Hi-RTPTM приёмник «EFT S2» имеет ещё одну важную особенность – это первый из производимых в России и протестированных авторами приёмник ГНСС, оснащенный технологией получения PPP-решений с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений / PPP with integer ambiguity resolution (PPP-AR). Как



известно, PPP требует достаточно длительного времени сходимости для достижения сантиметровой точности координат. Ключом к достижению наивысшей точности при высокоточном позиционировании точки PPP и значительному сокращению времени сходимости является разрешение целочисленной неоднозначности. К сожалению, из-за аппаратных фазовых искажений, исходящих от спутников и приемника, в PPP сложно преобразовать фазовые неоднозначности в их правильное целое число. Кроме того, поскольку PPP – это метод с нулевой разницей, приведение фазовых неоднозначностей к их правильному целому числу является более сложным, чем в методах относительного позиционирования, поскольку невозможно создать двойные разности для устранения вышеуказанных фазовых смещений [14].

Основная задача тестирования глобального PPP-сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTN™ как раз и заключалась в регистрации серий PPP-AR решений с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, получаемых НАП «EFT S2», подключенной к сервису Hi-RTN™, статистическая обработка результатов и оценка точности полученных PPP-AR решений.

### **3. Тестирование и оценка точности глобального PPP-сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTN™**

Основная программа тестирования PPP-сервиса Hi-RTN™ была реализована в период с 10 июля по 25 сентября 2024 г. Наблюдения с использованием НАП «EFT S2» производились практически ежедневно (за исключением периода с 18 июля по 02 августа 2024 г., когда сервис Hi-RTN™ был отключен), при разных погодных условиях, дожде, сильном ветре, шторме, в дневное и ночное время суток. Для целей оценки точности антенна НАП «EFT S2» была установлена на центре опорного пункта АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (АО «ГНИНГИ») (рис. 8).



**Рис. 8. Антенна НАП «EFT S2», установленная на центре Опорного пункта «POIN» АО «ГНИНГИ» (фото авторов статьи)**

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).

Получение уточнённых эфемерид и поправок часов навигационных спутников (SSR-информации) от сервера Hi-RTP™ по сети интернет в формате RTCM версии 3.2. Для этой НАП «EFT S2» был подключен через коммутатор к серверу сети интернет АО «ГНИНГИ» посредством выделенной линией витой пары категории 5е, как показано на рис. 9.

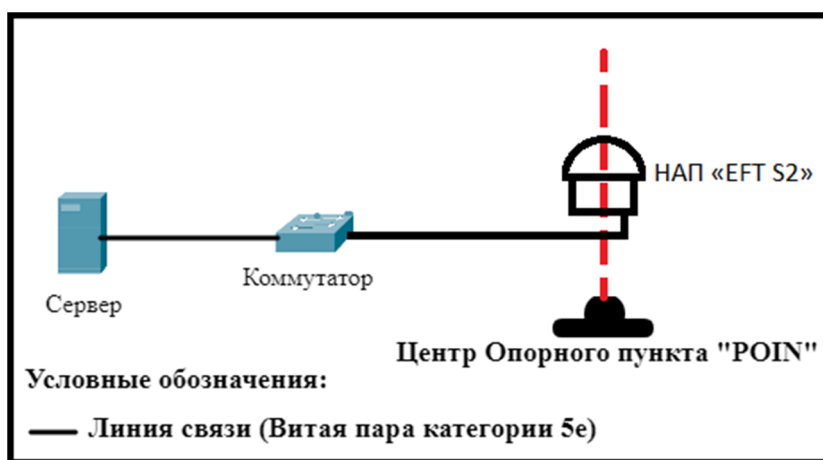


Рис. 9. Схема подключения НАП «EFT S2» к серверу АО «ГНИНГИ»

Для статистической обработки результатов наблюдений, полученных НАП «EFT S2», использовалось специализированное ПО «STOREGIS», версия 8.5.27.0.

Всего за период тестирования были получены 34 серии наблюдений с использованием НАП «EFT S2», подключенной на условиях подписки к сервису Hi-RTP™. По результатам обработки наблюдений все серии (для удобства назовём их сериями НАП «EFT S2» / Hi-RTP™) разделены на три группы:

- 1-я группа серий – с 10 июля до момента отключения сервиса Hi-RTP™ 18 июля;
- 2-я группа серий – с 2 августа (момент восстановления работы сервиса Hi-RTP™) до 26 августа;
- 3-я группа серий – с 26 августа по 25 сентября 2024 г.

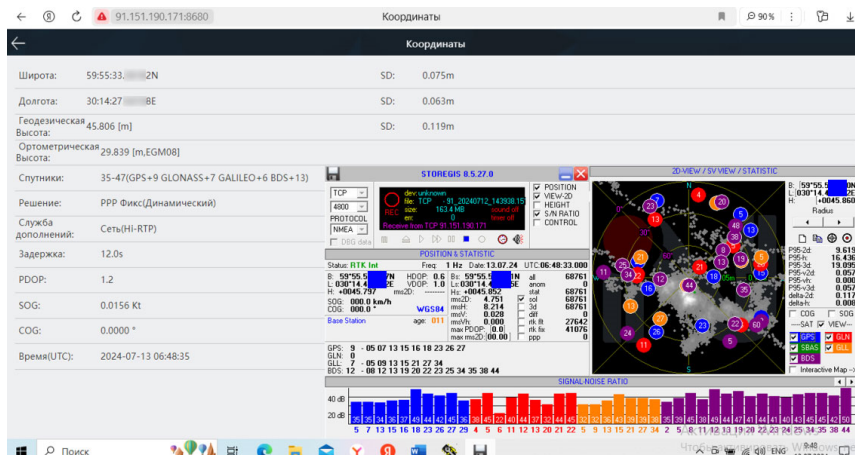
### 3.1. Результаты статистической обработки серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP™ первой группы

Первая группа серий включает 11 серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP™. Результаты обработки серий 1.1 – 1.11 первой группы приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты первой группы серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP™

| №    | Период PPP Фикс / RTK Integer серии (без инициализации) UTC |             | Продолжительность PPP/RTK-серии (час:мин.) | Количество PPP/RTK решений в серии Integer/Всего/Процент | Отклонение итогового решения PPP Фикс / RTK Int от координат Опорного пункта «POIN» |         |             |             | СКП решения PPP Фикс / RTK Integer (P 95 %) |       |
|------|---|-------------|--|--|---|---------|-------------|-------------|---|-------|
|      | Начало  | Конец       |  |  | delta В   | delta L | delta 2D(м) | delta H (м) | 2D (м)                                      | H (м) |
| 1.1  | 10.07 12:17   | 10.07 12:51 | 00:34                                      | 2029/ 2031/ 100  | 0",000  | 0",000  | 0,015       | -0,127      | 0,054                                       | 0,178 |
| 1.2  | 10.07 12:57   | 10.07 13:54 | 00:57                                      | 3440/ 3440/ 100  | 0",000  | -0",001 | 0,013       | -0,108      | 0,032                                       | 0,128 |
| 1.3  | 10.07 14:44   | 10.07 16:03 | 01:19                                      | 6541/ 6541/100   | -0",001   | +0",001 | 0,018       | -0,059      | 0,043                                       | 0,089 |
| 1.4  | 11.07 05:08   | 11.07 09:54 | 04:46                                      | 6687/ 16565/ 40  | -0",001   | -0",002 | 0,034       | +0,009      | 0,101                                       | 0,080 |
| 1.5  | 11.07 16:31   | 11.07 22:35 | 06:04                                      | 5602/ 21804/ 26  | -0",001   | 0",000  | 0,033       | -0,023      | 0,081                                       | 0,062 |
| 1.6  | 12.07 04:35   | 12.07 09:16 | 04:41                                      | 4796/ 16805/ 29  | -0",002   | +0",002 | 0,058       | +0,049      | 0,200                                       | 0,224 |
| 1.7  | 12.07 11:39   | 13.07 07:02 | 19:23                                      | 41297/ 69606/ 59   | -0",001   | -0",002 | 0,036       | -0,074      | 0,116                                       | 0,171 |
| 1.8  | 13.07 10:13   | 13.07 12:35 | 02:22                                      | 8571/ 8571/ 100  | -0",001   | -0",001 | 0,029       | -0,061      | 0,071                                       | 0,086 |
| 1.9  | 13.07 13:07   | 15.07 19:53 | 54:46                                      | 58068/ 192710 / 30                                       | -0",001   | -0",001 | 0,026       | -0,043      | 0,118                                       | 0,177 |
| 1.10 | 15.07 20:14   | 17.07 21:22 | 49:08                                      | 119323/ 174926 / 68                                      | -0",002   | 0",000  | 0,050       | -0,001      | 0,393                                       | 0,494 |
| 1.11 | 17.07 21:29   | 17.07 22:11 | 00:42                                      | 1326/ 2468/ 54   | +0",031   | +0",040 | 1,148       | -0,446      | 3,738                                       | 1,353 |

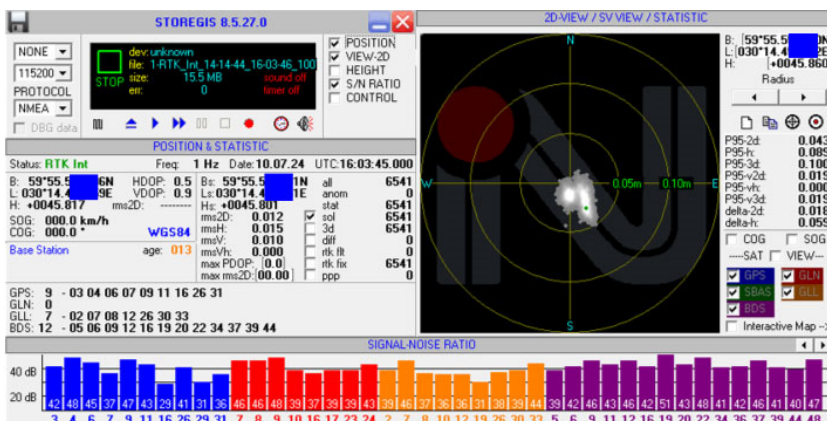
Необходимо отметить, что в WEB-интерфейсе «EFT S2» выбранное нами решение PPP-AR с разрешением целочисленной неоднозначности отображается как «PPP Фикс Динамический», а сервис Hi-RTP™ – как Сеть Hi-RTP (см. рис. 10 слева после слов «Решение» и «Служба дополнений» соответственно). А на экране ПО «STOREGIS» аналогичное PPP-AR решение отображается как RTK Int и выделено зеленым цветом (см. рис. 10 – на наложенном в нижней части окне ПО «STOREGIS» слева, после слова «Status»). В связи с этим для исключения разночтений в таблицах и далее в тексте тип решения PPP-AR будем обозначать как PPP Фикс/RTK Int.



**Рис. 10. Скриншот WEB-интерфейса «EFT S2» и наложенного на него окна ПО «STOREGIS» с мгновенным решением PPP Фикс/RTK Int 13.07.2024 (объяснения – в тексте)**

На скриншотах ПО «STOREGIS» на рис. 10 и далее синим цветом обозначены спутники ГНСС GPS, красным – ГЛОНАСС, бежевым – ГАЛИЛЕО и фиолетовым – БЕЙДОУ.

Первые три предварительные короткие серии, зарегистрированные в первый день наблюдений 10 июля, показали хороший результат со средней СКП 2D (P 95 %) в плане равной 0,043 м при 100 % количестве PPP Фикс / RTK Int решений в каждой серии (см. серии 1.1-1.3), который соответствовал ожиданиям от сервиса PPP-AR Hi-RTP™. Результаты обработки самой продолжительной из этих серий – серии 1.3 приведены на рис. 11.



**Рис. 11. Результаты серии 1.3 «EFT S2»/Hi-RTP™ от 10.07.2024 г., СКП 2D (P 95%) = 0,043 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,05 м (5 см)**

К сожалению, начиная с 11 июля все серии 1-й группы до серии 1.11, кроме серии 1.8 (рис. 12), показали менее стабильную работу, а количество PPP Фикс / RTK Int решений в сериях было далеко от 100 % и составило от минимальных 26 % (в серии 1.5) до 68 % (в серии 1.10) (табл. 2).



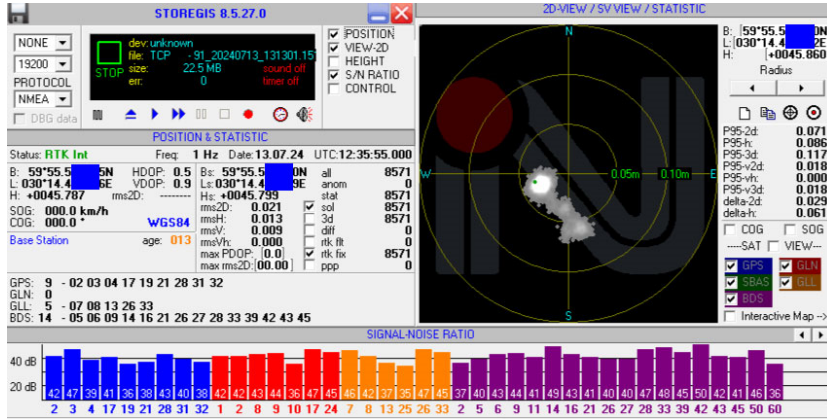


Рис. 12. Результаты серии 1.7 «EFT S2»/Hi-RTPTM от 13.07.2024 г., СКП 2D = 0,071 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,05 м (5 см)

Количество вычисленных решений PPP Фикс / RTK Int решений отображены в центральной колонке на скриншотах экрана ПО «STOREGIS», в которой указаны типы и количество решений. Так, в серии 1.3 соотношение таких PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) составляет  $6541/6541=100\%$  (рис. 11). В серии 1.7 –  $8571/8571=100\%$  (рис. 12).

В серии 1.10 при выборе обработки только PPP Фикс/RTK Int решений (см. галочку «rtk fix», означающую PPP Фикс, и число «stat», означающее количество решений, принятых в статистическую обработку, которые расположены в центре рис. 13 и 14) значение СКП 2D (P 95 %) в плане возросло до 0,393 м, а максимальное отклонение решений достигло 1,3 м (рис. 13). Соотношение PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) в серии 1.10 составило только  $119323/174926=68\%$  (рис. 14). А СКП 2D (P 95 %) PPP Фикс / RTK Int решений серии 1.11 от 17.07.2024 и вовсе достигла 3,7 м, а отклонение итоговых координат серии 1.11 в плане составило более 1,1 м, (табл. 2), что явно указывало на некорректную работу «EFT S2» / Hi-RTPTM.

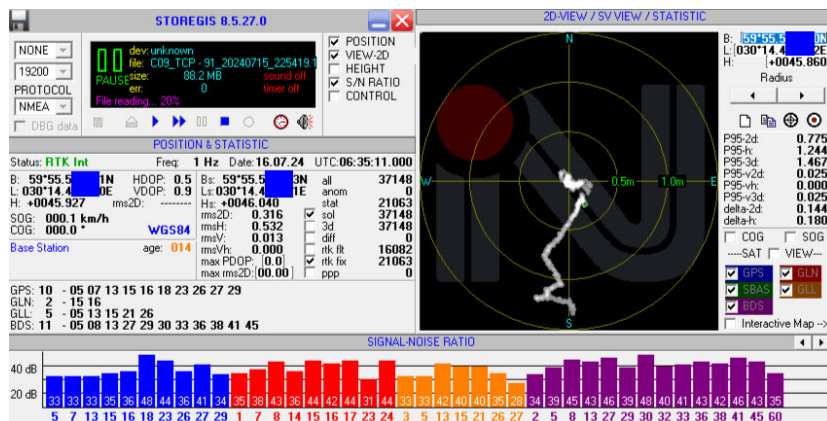


Рис. 13. Уход PPP Фикс/RTK Int решений в ходе серии 1.10 до значений 1,3 метра 16.07.2024. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,5 м (50 см)

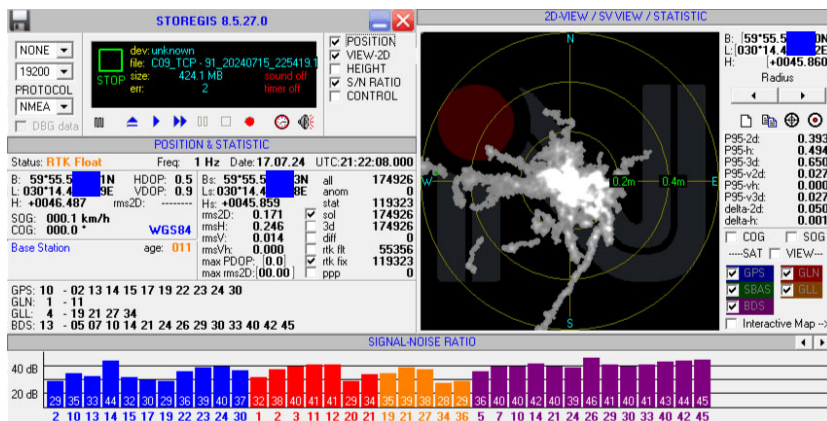


Рис. 14. Результаты серии 1.10 «EFT S2»/Hi-RTP™ от 17.07.2024 г., СКП 2D = 0,393 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,2 м (20 см).

Авторы пришли к выводу, что ухудшение работы «EFT S2» / Hi-RTP™ начиная с 11.07.2024 г. было вызвано внешним фактором (усиление искусственных радиопомех) в связи с проводившимся 11–12 июля в Санкт-Петербурге X Парламентским форумом БРИКС с участием Президента РФ, а также другими причинами оборонного характера. В дальнейшем на фоне некорректной работы сервиса Hi-RTP™ в ночь на 18 июля 2024 г. НАП «EFT S2» перестала выдавать высокоточное решение «PPP Фикс Динамический». Как сообщили представители компании «EFT Group» со ссылкой на своих китайских партнеров, в результате всемирного глобального сбоя в работе IT-систем, произошедшего 17.07.2024, была нарушена работа некоторых зарубежных серверов, снабжавших данными Центр обработки данных сервиса Hi-RTP™, вследствие чего сервис Hi-RTP™ временно перестал транслировать высокоточную корректирующую информацию.

По результатам обработки первой группы серий «EFT S2»/Hi-RTP™ следует отметить, что в вычислении решений PPP Фикс / RTK Int с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений не участвуют или участвуют в минимальном количестве спутники ГНСС «ГЛОНАСС». Количество и номера спутников ГНСС, участвующих в вычислении решений PPP Фикс / RTK Int, отображаются на скриншотах ПО «STOREGIS» в левом нижнем углу над шкалой «Отношение сигнал-шум / SIGNAL-NOISE RATIO». В сериях 1.3 и 1.7, например, количество участвующих в вычислении PPP Фикс / RTK Int решений спутников ГЛОНАСС=0, хотя количество принимаемых НАП «EFT S2» спутников ГЛОНАСС (отображаются красным цветом) в ходе этих серий составляет соответственно 8 и 7 спутников (рис. 11, 12). А в серии 1.10 количество таких спутников ГЛОНАСС составляет 16.07.2024 два спутника (рис. 13) и 17.07.2024 – один спутник (рис. 14).

Авторы считают, что отсутствие или минимальное количество спутников ГЛОНАСС в PPP Фикс / RTK Int решениях может быть связано со сложностью корректного решения задачи разрешения целочисленных неоднозначностей фазовых измерений по ГНСС «ГЛОНАСС» в мультисистемных приёмниках ГНСС различных производителей, входящих в состав сети базовых станций провайдера PPP-услуги Hi-RTP™.

### 3.2. Результаты статистической обработки серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP™ второй группы

НАП «EFT S2» была повторно подключена к сервису высокоточного позиционирования Hi-RTP™ только 02 августа 2024 г. Регистрация наблюдений после восстановления работы «EFT S2»/Hi-RTP™ возобновилась в 10 час 16 мин 02.08.24 (табл. 3).

Таблица 3. Результаты второй группы серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP

| №    | Период PPP Фикс / RTK Integer серии (без инициализации) UTC |             | Продолжительность PPP/RTK-серии (час:мин.) | Количество PPP/RTK решений в серии Integer/Всего/ Процент | Отклонение итогового решения PPP Фикс / RTK Int от координат Опорного пункта «POIN» |         |             |             | СКП решения PPP Фикс / RTK Integer (P 95 %) |       |
|------|---|-------------|--|---|---|---------|-------------|-------------|---|-------|
|      | Начало  | Конец       |  |   | delta В   | delta L | delta 2D(м) | delta H (м) | 2D (м)                                      | H (м) |
| 2.1  | 02.08 10:16   | 03.08 05:50 | 19:34                                      | 42436/ 70040/ 61  | -0",001   | -0",004 | 0,062       | -0,047      | 0,514                                       | 0,458 |
| 2.2  | 03.08 11:22   | 03.08 16:22 | 05:00                                      | 9896/ 17838/ 55   | 0",000  | +0",002 | 0,028       | -0,035      | 0,279                                       | 0,210 |
| 2.3  | 03.08 16:55   | 06.08 14:54 | 69:59                                      | 250088/ /250250 / 100                                     | -0",000   | 0",000  | 0,028       | -0,037      | 0,079                                       | 0,105 |
| 2.4  | 06.08 14:57   | 08.08 00:06 | 44:46                                      | 119326/ 119326 / 100                                      | -0",001   | 0",000  | 0,025       | -0,041      | 0,080                                       | 0,118 |
| 2.5  | 09.08 07:14   | 11.08 04:00 | 56:03                                      | 159930/ 159930 / 100                                      | -0",001   | +0",001 | 0,030       | -0,029      | 0,084                                       | 0,115 |
| 2.6  | 11.08 06:32   | 13.08 14:36 | 56:04                                      | 200357/ 200358 / 100                                      | +0",007   | +0",083 | 0,018       | -0,039      | 0,070                                       | 0,108 |
| 2.7  | 13.08 22:57   | 15.08 23:37 | 48:40                                      | 175191/ 175193 / 100                                      | -0",001   | 0",000  | 0,022       | -0,039      | 0,073                                       | 0,116 |
| 2.8  | 15:08 23:42   | 22.08 20:08 | 164:26                                     | 591572/ 591572 / 100                                      | -0",001   | +0",000 | 0,021       | -0,025      | 0,070                                       | 0,108 |
| 2.9  | 22.08 20:09   | 24.08 09:51 | 37:42                                      | 135365/ 135365 / 100                                      | -0",001   | +0",001 | 0,024       | -0,031      | 0,072                                       | 0,102 |
| 2.10 | 24.08 14:49   | 25.08 11:07 | 20:18                                      | 73078/ 73078/ 100   | 0",000  | 0",000  | 0,015       | -0,026      | 0,050                                       | 0,082 |
| 2.11 | 25.08 12:12   | 26.08 11:55 | 23:43                                      | 85152/ 85152/ 100   | -0",001   | +0",001 | 0,025       | -0,034      | 0,064                                       | 0,112 |

Процесс завершения схождения (итерации) PPP-решений серии 2.1 начиная с расстояния 1,2 м до расстояния в плане 0,1 м от Опорного пункта, который занял порядка 10 мин. с 10:06:25 до 10:16:16 02.08.2024 г., представлен на рис. 15.

Всего во вторую группу серий включены 11 серий (2.1 – 2.11), зарегистрированных в период с 02 по 26 августа 2024 г. Первые две серии 2.1 и 2.2 после восстановления работы «EFT S2»/Hi-RTP™ вновь показали нестабильную работу, как и большинство серий 1-й группы. Соотношение PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) в серии 2.1 составило 42436/70440=61 %, а СКП 2D (P 95 %) в плане PPP Фикс / RTK Int решений оказалась равной 0,517 м. В следующей серии эти же значения составили: соотношение PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) – 55 %, а СКП 2D (P 95 %) в плане – 0,279 м соответственно (табл. 3).

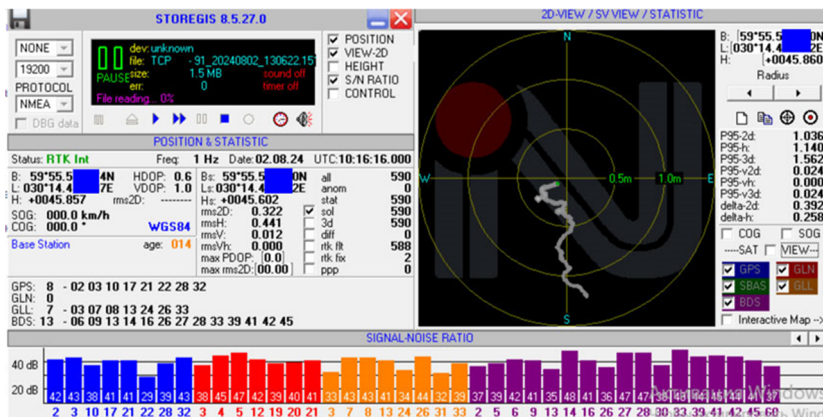


Рис. 15. Процесс завершения схождения (итерации) PPP-решений серии 2.1 начиная с расстояния 1,2 м до расстояния 0,1 м в плане от Опорного пункта, 02.08.2024 г. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,5 м (50 см)

Серия 2.3 стала второй по продолжительности из серий 2-й группы и длилась без двух часов трое суток – с 16:55 03.08.2024г. по 14:54 06.08.2024г. Отношение PPP Фикс (rtk fix) решений к общему числу (all) зарегистрированных в серии 2.3 решений составило  $250088/250250=99,9994\%$ , т. е. практически 100 %. Ещё 162 решения PPP/rtk float (т. е. не PPP Фикс) из общего количества 250250 решений (0,0006 %) никак не повлияли отрицательно на результат серии. СКП 2D (P 95 %) в плане PPP Фикс / RTK Int решений оказалась равной 0,079 м (рис. 16).

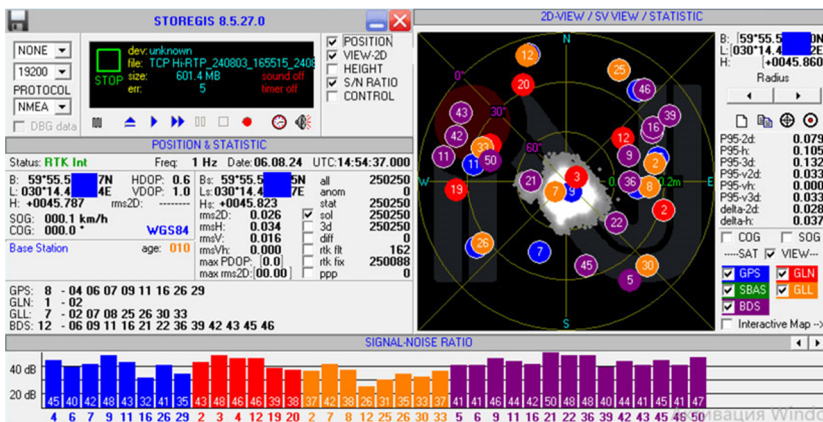


Рис. 16. Результаты серии 2.3 «EFT S2»/Hi-RTIP™ от 06.08.2024 г., СКП 2D = 0,079 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,1 м (10 см)

Как видно на рис. 16, количество участвующих в вычислении PPP Фикс/RTK Int решений спутников ГЛОНАСС=1, хотя количество принимаемых НАП «EFT S2» спутников ГЛОНАСС (отображаются красным цветом) в ходе серии составляет шесть спутников. Данный спутник ГЛОНАСС под номером 2 отображается в красном кружочке, обведенном белой окружностью, и расположен на «мишени» справа. Остальные пять спутников ГЛОНАСС белой окружностью не обведены как не участвующие в вычислении PPP Фикс / RTK Int решений.

Самой продолжительной из 2-й группы серий стала серия 2.8 длившаяся почти семь суток (без 3 час. 34 мин.) с 23:42 15.08.2024г. по 20:08 22.08.2024 г. (табл. 3, рис. 17).

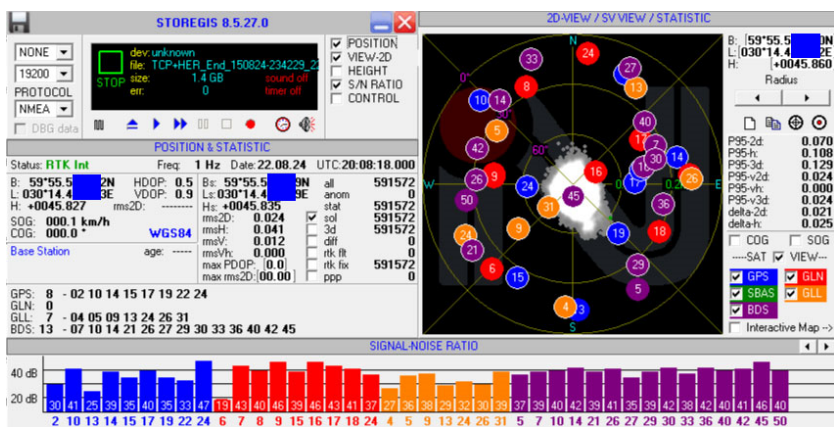


Рис. 17. Результаты серии 2.8 «EFT S2»/Hi-RTP™ от 22.08.2024 г., СКП 2D = 0.070 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,1 м (10 см)

Соотношение PPP Фикс (rtk fix) решений и общего числа (all) зарегистрированных в серии 2.8 решений составило  $591572/591572=100\%$ . СКП 2D (P 95%) в плане PPP Фикс/ RTK Int решений оказалась равной 0,070 м, а количество участвующих в вычислении PPP Фикс/RTK Int решений спутников ГЛОНАСС=0. Следует также отметить, что отклонение в плане итоговых средневзвешенных координат серии 2.8, продолжавшейся в течение семи суток, от координат Опорного пункта составило 0,021 м (рис. 17).

После завершения серии 2-й группы 2.11 в 11:55 26 августа 2024 г. работа сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTP™ вновь неожиданно ухудшилась и стала не оптимальной.

### 3.3. Результаты статистической обработки серий наблюдений

#### НАП «EFT S2» / Hi-RTP™ третьей группы

В третью группу серий включены 13 серий (3.1 – 3.13), зарегистрированных в период с 26 августа по 25 сентября 2024 г. И вновь первые две серии 3.1 и 3.2 показали нестабильную работу, как и большинство (9 из 12) серий 3-й группы и (табл. 4). В указанных 9 сериях третьей группы соотношения PPP Фикс (rtk fix) решений и общего числа (all) зарегистрированных в этих сериях решений составили от минимальных 20 % (серия 3.8) до 75 % (серия 3.1). Уже в первой серии этой группы соотношение PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) сократилось до  $152506/204654=75\%$ , максимальное отклонение PPP Фикс/RTK Int решений достигло 0,6 м, а СКП 2D (P 95 %) в плане резко увеличилась до 0,561 м (рис. 18). В следующей серии 3.2 при 44 % PPP Фикс (rtk fix) решений СКП 2D (P 95 %) в плане – 0,411 м соответственно (табл. 4).



Таблица 4. Результаты третьей группы серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP

| №    | Период PPP Фикс / RTK Integer серии (без инициализации) UTC |                | Продолжительность PPP/RTK-серии (час:мин.) | Количество PPP/RTK решений в серии Integer/Всего/Процент | Отклонение итогового решения PPP Фикс / RTK Int от координат Опорного пункта «POIN» |         |             |             | СКП решения PPP Фикс / RTK Integer (P 95%) |       |
|------|---|----------------|--|--|---|---------|-------------|-------------|--|-------|
|      | Начало  | Конец          |  |  | delta В   | delta L | delta 2D(м) | delta H (м) | 2D (м)                                     | H (м) |
| 3.1  | 26.08<br>12:11  | 28.08<br>21:14 | 57:03                                      | 152506/ 204654/ 75                                       | 0",000  | 0",000  | 0,009       | -0,031      | 0,561                                      | 0,294 |
| 3.2  | 28.08<br>21:35  | 29.08<br>21:07 | 23:32                                      | 35625/ 81153/ 44   | +0",001   | -0",001 | 0,023       | -0,077      | 0,411                                      | 0,348 |
| 3.3  | 29.08<br>23:34  | 30.08<br>08:12 | 08:38                                      | 11160/ 30651/ 36   | 0",000  | 0",000  | 0,005       | -0,010      | 0,068                                      | 0,077 |
| 3.4  | 30.08<br>08:45  | 31.08<br>14:37 | 29:52                                      | 105464/ 106343/ 99                                       | 0",000  | +0",002 | 0,026       | -0,034      | 0,063                                      | 0,043 |
| 3.5  | 01.09<br>07:27  | 01.09<br>11:15 | 03:48                                      | 13561/ 13573/ 100  | 0",000  | +0",001 | 0,016       | -0,043      | 0,016                                      | 0,043 |
| 3.6  | 01.09<br>12:58  | 03.09<br>19:03 | 54:05                                      | 181343/ 194328/ 93                                       | 0",000  | +0",001 | 0,015       | -0,038      | 0,044                                      | 0,071 |
| 3.7  | 03.09<br>19:30  | 07.09<br>19:45 | 96:15                                      | 189767/ 343645/ 55                                       | 0",000  | +0",001 | 0,015       | -0,034      | 0,096                                      | 0,132 |
| 3.8  | 12.09<br>12:40  | 13.09<br>08:08 | 19:28                                      | 13862/ 69905/ 20   | -0",002   | -0",001 | 0,049       | -0,005      | 0,147                                      | 0,132 |
| 3.9  | 17.09<br>12:12  | 19.09<br>02:04 | 37:52                                      | 60451/ 135945/ 44  | -0",002   | -0",001 | 0,061       | -0/011      | 0,420                                      | 0,443 |
| 3.10 | 19.09<br>02:37  | 20.09<br>07:44 | 24:05                                      | 29970/ 103407/ 29  | -0",001   | 0,000   | 0,023       | -0,053      | 0,103                                      | 0,129 |
| 3.11 | 20.09<br>14:05  | 22.09<br>22:51 | 56:46                                      | 62768/ 200587/ 31  | -0",001   | -0",001 | 0,026       | -0,061      | 0,113                                      | 0,180 |
| 3.12 | 23.09<br>00:36  | 24.09<br>18:29 | 39:53                                      | 69320/ 149015/ 47  | -0",001   | -0",001 | 0,022       | -0,036      | 0,212                                      | 0,149 |
| 3.13 | 24.09<br>18:51  | 25.09<br>00:05 | 03:14                                      | 11877/ 18597/ 64   | -0",001   | -0",002 | 0,056       | -0,022      | 0,367                                      | 0,300 |

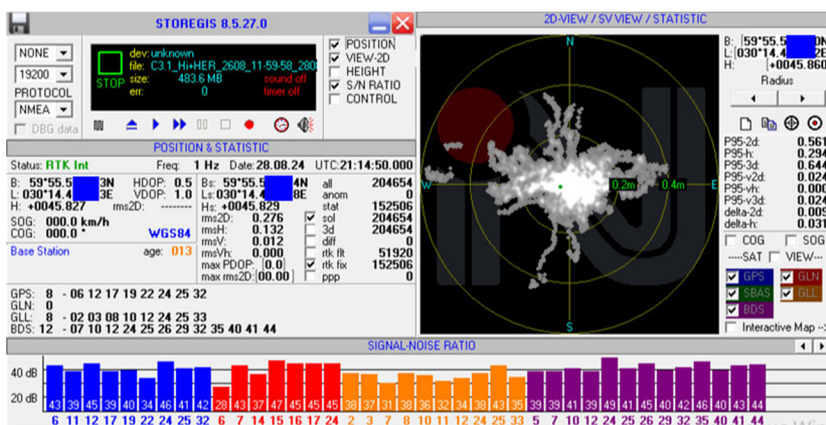


Рис. 18. Результаты серии 3.1 «EFT S2»/Hi-RTP™ от 28.08.2024 г., СКП 2D = 0,561 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,2 м (20 см)

На рис. 18 видно, что количество участвующих в вычислении PPP Фикс/RTK Int решений спутников ГЛОНАСС равно 0, а максимальное отклонение в ходе серии 3.1 PPP Фикс/ RTK Int решений достигало 0,6 м.

Напротив, в третьей серии этой группы (серия 3.3 в табл. 4) при ещё большем уменьшении соотношения PPP Фикс (rtk fix) решений к их общему числу (all) до 36 %, величина СКП 2D (P 95 %) в плане составила привлекательные 0,068 м (рис. 19).

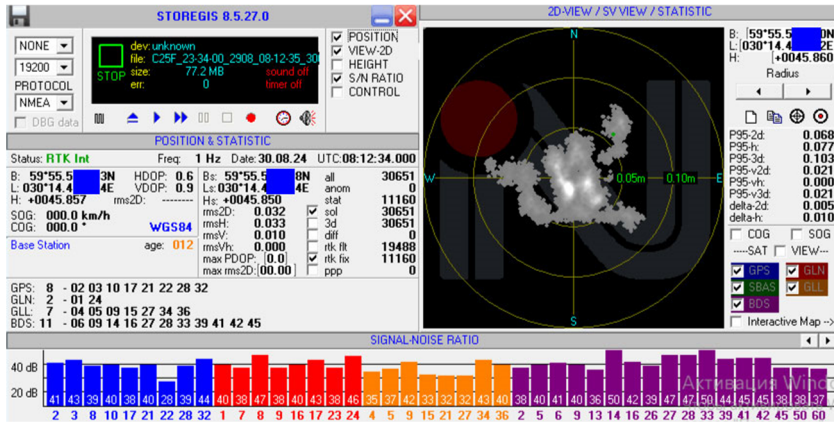


Рис. 19. Результаты серии 3.3 «EFT S2»/Hi-RTPTM от 30.08.2024 г., СКП 2D = 0,068 м. Радиус минимального круга «мишени» составляет 0,05 м (5 см)

Здесь интересно отметить, что в серии 3.3 два спутника ГЛОНАСС (под номерами GLN 01 и GLN 24, см. рис. 19 слева внизу) участвовали в вычислении PPP Фикс/RTK Int решений.

Учитывая продолжившуюся нестабильную работу сервиса Hi-RTPTM и достаточное количество серий, зарегистрированных в Режиме позиционирования «PPP Фикс Динамический» (в терминологии WEB-интерфейса «EFT S2»), авторы приняли решение протестировать работу «EFT S2»/Hi-RTPTM в Режиме позиционирования «Статический», который устанавливается в WEB-интерфейсе «EFT S2», см. рис. 20 и 21.

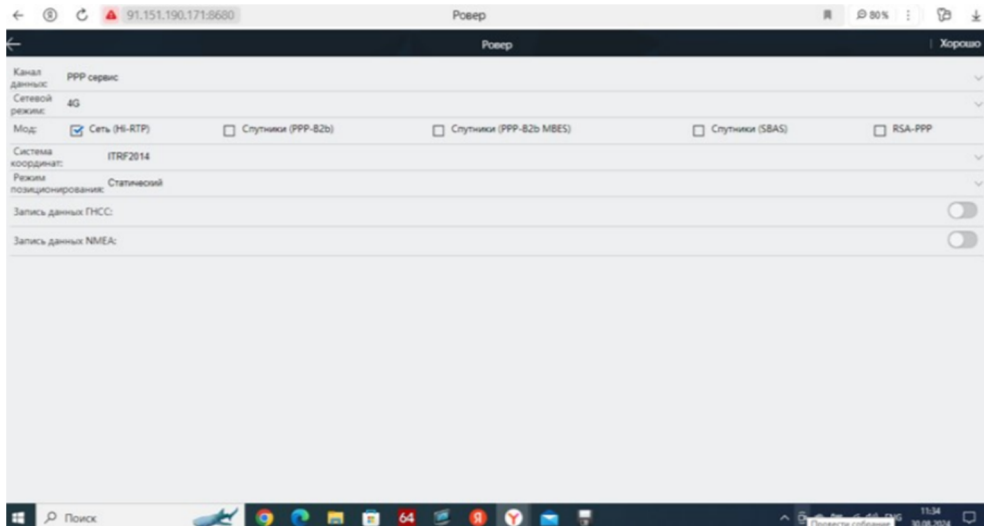


Рис. 20. Выбор режима позиционирования «Статический» при использовании сети Hi-RTPTM (см. слева вверху на скриншоте WEB-интерфейса «EFT S2»)

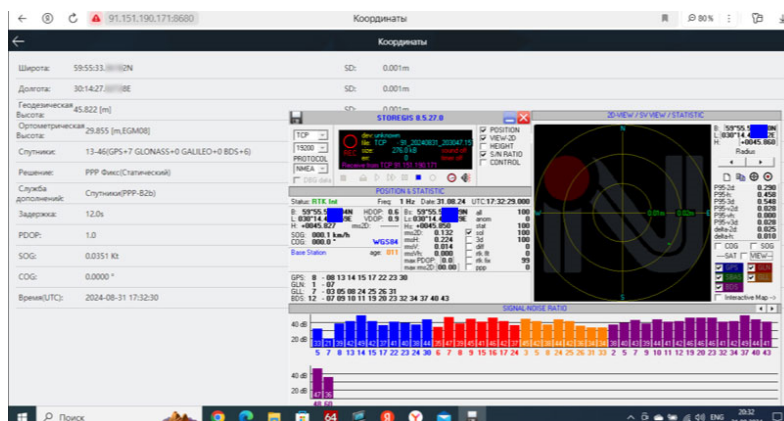


Рис. 21. Пример решения PPP Фикс «Статический» при использовании службы дополнений Спутники (PPP-B2b) (см. слева на скриншоте WEB-интерфейса «EFT S2»)

Следующие три серии этой группы (3.4, 3.5 и 3.6), зарегистрированные в режиме позиционирования «Статический», ожидаемо показали результаты, отличающиеся в лучшую сторону от других серий третьей группы, с соотношением PPP Фикс (rtk fix) и общего числа (all), зарегистрированных в этих сериях решений 99 % (серия 3.4), 100 % (серия 3.5) и 93 % (серия 3.6). Указанные значения разительно отличаются от аналогичных значений процентов PPP Фикс/RTK Int, зарегистрированных в остальных девяти сериях этой группы (от 20 % до 75 %) (табл. 4). Величины СКП 2D серий 3.4 – 3.6 составили от 0,016 м до 0,063 м. Наиболее показательными являются результаты серии 3.5 со 100 % зарегистрированных PPP Фикс/RTK Int решений и величиной СКП 2D (P95 %) = 0,016 м, представленные на рис. 22.

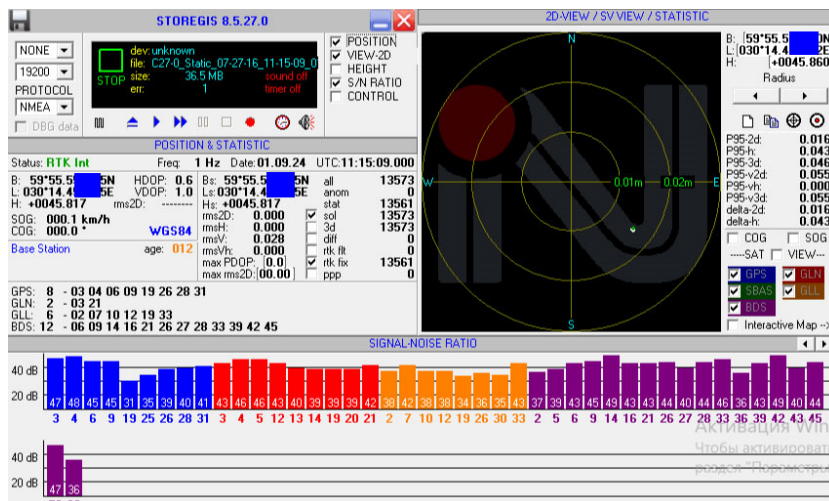


Рис. 22. Результаты серии 3.5 «EFT S2»/Hi-RTP™ в режиме «Статический» от 01.09.2024 г., СКП 2D (P95%) = 0,016 м. R<sub>min</sub> круга «мишени» составляет 0,01 м (1 см)

Как видно на «мишени» окна ПО «STOREGIS» на рис. 22, в режиме «Статический» практически в одной точке «мишени» «лежат» все 13561 PPP



Фикс/RTK Int решений с колебаниями в пределах двух миллиметров. Высокую точность и устойчивость работы «EFT S2»/Hi-RTPTM показывают также идентичные отклонения в плане (0,016 м) и по высоте (0,043 м) от координат Опорного пункта значения СКП (P95 %) координат в плане и СКП (P95 %) высоты этой серии. Это подтверждает, что все ежесекундные решения этой «статической» серии находятся практически в одной точке пространства даже в период нестабильной работе Hi-RTPTM.

Обратите внимание на ещё одну серию из третьей группы – 3.9, которая интересна по двум причинам:

- во-первых, в ходе выполнения этой серии 18.09.2024 г. начались параллельные наблюдения с использованием отечественной НАП «Аппаратура ПС», подключенной к независимому российскому PPP-сервису «СВО ЭВИ», результаты которых будут рассмотрены ниже в следующем параграфе;

- во-вторых, при достаточно стабильном течении серии был зафиксирован неординарный краткосрочный «отскок» PPP Фикс/RTK Int решений от координат Опорного пункта на 1,2 м, выявленный в ходе статистической обработки и продолжавшийся всего несколько секунд (рис. 23).

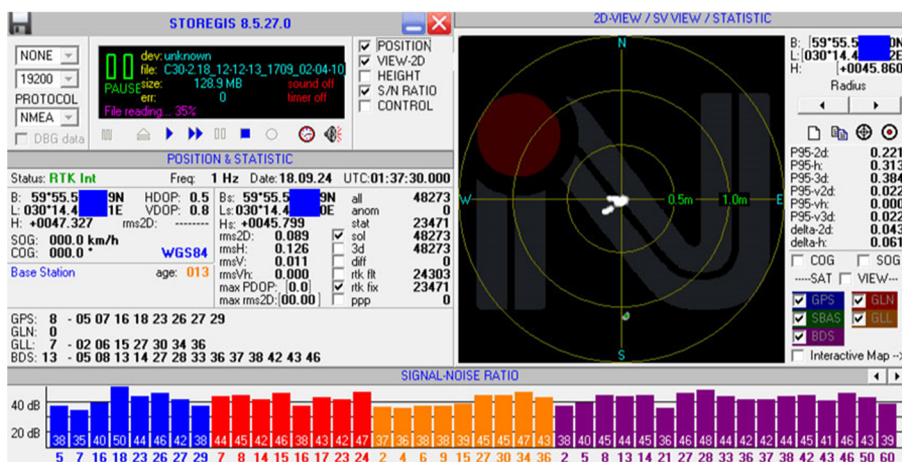


Рис. 23. Графическое отображение «отскока» группы PPP Фикс/RTK Int решений на 1,2 м по направлению на S от координат Опорного пункта в ходе серии 3.8 18.09.2024 г.  $R_{min}$  круга «мишени» составляет 0,5 м (50 см)

На мишени, представленной на рис. 23, отчётливо видна группа из нескольких последовательных PPP Фикс/RTK Int решений, последнее из которых в виде точки зелёного цвета зарегистрировано 18.09.2024 г. в 01:37:30 на расстоянии порядка 1,1 м в плане от центра Опорного пункта (от центра «мишени»). Это тем более неожиданно, что уровни сигнал/шум в момент «отскока» достаточного числа «видимых» спутников у всех четырёх ГНСС превышают 40 dB. Такие краткосрочные «отскоки» в предыдущих сериях не наблюдались. Данный краткосрочный «отскок» серьёзно ухудшил итоговые результаты серии 3.8, приведенные на рис. 24.

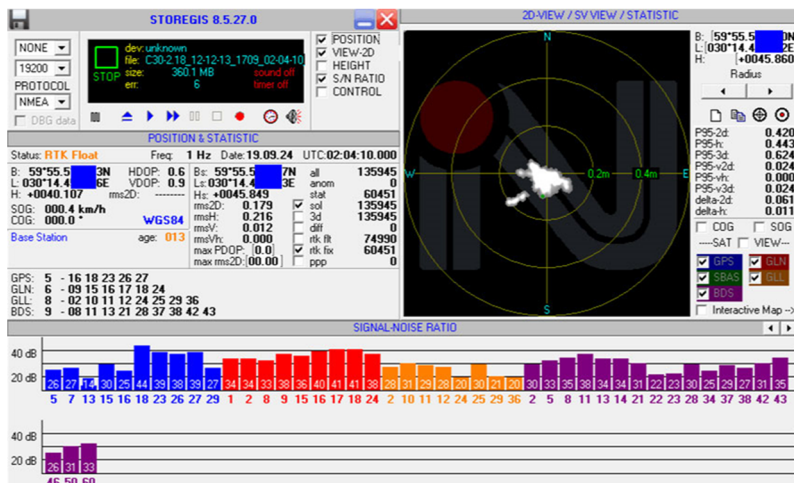


Рис. 24. Результаты серии 3.8 «EFT S2»/Hi-RTPTM от 19.09.2024 г., СКП 2D (P95%) = 0,420 м.  $R_{min}$  круга «мишени» на рис. 22 составляет 0,2 м (20 см)

На рис. 24 видно, все практически все PPP Фикс/RTK Int решения этой серии попали в круг с минимальным радиусом=0,2 м. Решения, попавшие в группу «отскока», на рис. 24 отсутствуют из-за более крупного масштаба «мишени».

Для сравнения выделим выбросы PPP Фикс/RTK Int решений в ходе завершающих серий третьей группы – 3.12 и 3.13. На рис. 25 представлено графическое отображение на «мишени» окна ПО «STOREGIS» уходов PPP Фикс/RTK Int решений серии 3.12.

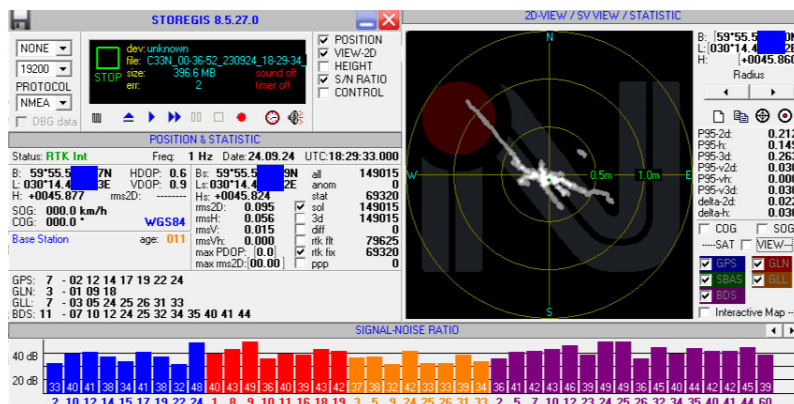


Рис. 25. Графическое отображение уходов PPP Фикс/RTK Int решения на 1,2 м и 0,75 м от координат опорного пункта в ходе серии 3.12.  $R_{min}$  круга «мишени» составляет 0,5 м (50 см)

Как видно на рис. 25, уходы на 1,2 м и на 0,75 м от центра «мишени» происходили единообразно: сначала произошёл «отскок» PPP Фикс/RTK Int решений – в первом случае на 1,2 м на NW от центра «мишени» и во втором – на 0,75 м от центра «мишени» по направлению ESE. Затем в обоих случаях происходило плавное возвращение решений к центру «мишени», что отображено в виде шлейфа на «мишени»

скриншота окна ПО «STOREGIS». Также на рис. 25 виден уход значительной группы PPP Фикс/RTK Int решений в виде обособленного ореола на расстоянии 0,4–0,45 м по направлению на NE.

Аналогичный характер ухода PPP Фикс/RTK Int решений на расстояние до 0,9 м от центра «мишени», представленного на рис. 26, наблюдался и в ходе серии 3.13 24.09.2024 г.

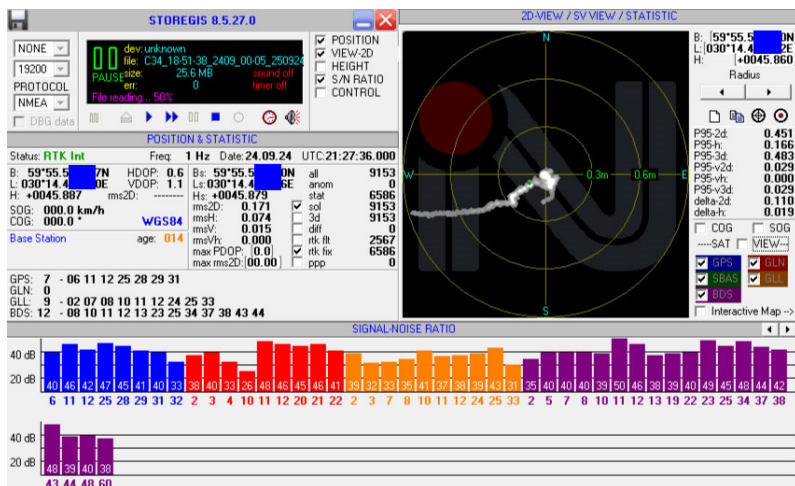


Рис. 26. Графическое отображение ухода PPP Фикс/RTK Int решений на 0,9 м от координат Опорного пункта в ходе серии 3.13.  $R_{min}$  круга «мишени» составляет 0,3 м (30 см)

В этой серии также сначала произошёл «отскок» PPP Фикс/RTK Int решений на 0,9 м от центра «мишени» по направлению на WSW. Затем происходило плавное возвращение решений к центру «мишени», что отображено в виде шлейфа на «мишени» скриншота окна ПО «STOREGIS» на рис. 26. Представленные на рис. 25, 26 уходы PPP Фикс/RTK Int решений в сериях 3.12 и 3.13 в отличие от «отскока» в серии 3.8 (рис. 23) напоминают по характеру процесс завершения схождения (итерации) PPP-решений перед началом серии 2.1. Указанные выше уходы, имевшие место в сериях третьей группы, подтвердили нестабильную работу «EFT S2»/Hi-RTP™ в этот период наблюдений.

Завершение серии наблюдений 3.13 25 сентября в 00:05 ознаменовало собой и завершение всей программы тестирования высокоточного сервиса позиционирования Hi-RTP™ в 2024 г.

#### 4. Результаты статистической обработки серий наблюдений НАП «Аппаратура ПС», подключённой к PPP-сервису «СВО ЭВИ»

Отмеченная выше нестабильная работа «EFT S2»/Hi-RTP™ убедила авторов в необходимости организовать параллельное тестирование с использованием независимого высокоточного сервиса позиционирования с реализованной PPP-технологией для оценки влияния уровня корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервиса Hi-RTP™ и точность получаемых результатов. Соответствующее тестирование было организовано на заключительном этапе

тестирования сервиса Hi-RTP™ с использованием отечественной инновационной аппаратуры НАП «Аппаратура ПС», разработанной АО «Конструкторское бюро навигационных систем» (далее – АО «КБ НАВИС») и оперативно предоставленной для этой цели Санкт-Петербургским филиалом АО «КБ НАВИС». НАП «Аппаратура ПС» получал необходимую корректирующую информацию по сети Интернет от сервера Глобальной системы высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ), в которой такая информация называется «ассистирующей».

#### **4.1. Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации СВО ЭВИ**

Система СВО ЭВИ разработана АО «Научно производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения"», г. Москва, в соответствии с Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» и предназначена для обеспечения прецизионной навигации потребителей в реальном времени в абсолютном режиме, а также для решения координатно-временных задач в апостериорном режиме по сигналам ГЛОНАСС и других развернутых глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [15].

СВО ЭВИ включает [16]:

- центр управления системой – основной (ЦУС-О СВО ЭВИ);
- центр управления системой – резервный (ЦУС-Р СВО ЭВИ);
- глобальную сеть измерительных станций (СИС) ГНСС;
- навигационную аппаратуру потребителей (НАП);
- подсистему доставки информации (ПДИ).

Центр управления системой Основной расположен в г. Королев (Московская область), параметры и характеристики точности СВО ЭВИ полного состава приведены в работе [15, с. 42, 45].

Ассистирующая информация СВО ЭВИ, сформированная на основе высокоточной ЭВИ, передаётся по наземным общедоступным каналам связи (Internet) и обрабатывается совместно с сигналами ГНСС в специализированной навигационной аппаратуре потребителя (в нашем случае – НАП «Аппаратура ПС»), что обеспечивает улучшение точности навигации до сантиметрового уровня. Данные, передаваемые в режиме реального времени, доступны только зарегистрированным потребителям. Апостериорная информация доступна потребителям без ограничений [16].

В условиях функционирования измерительных станций глобальной сети первого этапа погрешность определения местоположения в государственной геоцентрической системе координат за счёт космического сегмента с использованием данных СВО ЭВИ не превышает 0,3 м в оперативном режиме и 0,05 м в апостериорном режиме. При создании на втором этапе глобальной сети измерительных станций в полном объеме указанная погрешность в оперативном режиме не будет превышать 0,1 м, в апостериорном режиме 0,03 м [16].

#### **4.2. Мультисистемный приемник ГНСС геодезического класса точности «Аппаратура ПС» АО «КБ НАВИС»**

Параллельное тестирование выполнялись с использованием геодезического приёмника «Аппаратура ПС», разработанного АО «Конструкторское бюро

навигационных систем» (АО «КБ НАВИС»), предоставленного его Санкт-Петербургским филиалом. НАП «Аппаратура ПС», в которой реализован режим PPP, представляет собой высокоточный мультисистемный, мультиканальный (432 канала) приемник ГНСС, предназначенный для выполнения геодезических работ, ведения государственного земельного кадастра и мониторинга земель с использованием навигационной, корректирующей и ассистирующей информации глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/BEIDOU, SBAS и системы прецизионной навигации, с возможностью записи данных для постобработки (Опытная серия 2023 г.). Внешний вид приёмника приведен на 27.



Рис. 27. Мультисистемный геодезический приёмник ГНСС «Аппаратура ПС» АО «КБ НАВИС» [17]

Подробные технические характеристики НАП «Аппаратура ПС» приведены в описании [17], а характеристики точности представлены в табл. 5.

Таблица 5. Заявленные характеристики точности НАП «Аппаратура ПС»

|   |  |
|---|--|
| Автономный режим в неподвижном состоянии (RMS)                                | 1,2 м (в плане);<br>2,0 м (по высоте)                        |
| Дифференциальные кодовые измерения в неподвижном состоянии                    | 0,6 м (в плане);<br>0,9 м (по высоте)                        |
| Режим "Статика" и "Быстрая статика"   | 5 мм + 0,5 мм/км (в плане);<br>10 мм + 1 мм/км (по высоте)   |
| Режим RTK   | 8 мм + 0,5 мм/км (в плане);<br>15 мм + 1,0 мм/км (по высоте) |
| Режимы «Статика» и «Быстрая статика» (базисов от 0,07 до 100 км)              | 5 мм + 0,5 мм/км (в плане);<br>10 мм + 1,0 мм/км (по высоте) |
| Режим PPP в реальном времени (от СВО ЭВИ)                                     | 0,3 м (в плане);<br>0,4 м (по высоте)                        |
| <b>Время начальных определений:</b>   |  |
| "Холодный" старт  | 36 сек   |
| "Горячий" старт   | 5 сек  |
| повторный   | 1 сек  |
| в режиме статических определений (сеанс 4 часа, апостериорные данные СВО ЭВИ) | 0,02 м (по плановым координатам);<br>0,05 м (по высоте).     |



### 4.3. Тестирование и оценка точности глобального PPP-сервиса СВО ЭВИ

Тестирование PPP-сервиса СВО ЭВИ с использованием НАП «Аппаратура ПС» (далее – «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ) было проведено в период с 18 по 25 сентября 2024 г. параллельно с пятью заключительными сериями наблюдений 3.9 – 3.13 «EFT S2»/Hi-RTPTM». Наблюдения «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ производились ежедневно при абсолютно одинаковых условиях с «EFT S2»/Hi-RTPTM». Для целей оценки, в первую очередь, стабильности работы «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ и возможного влияния уровня корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервисов Hi-RTPTM и СВО ЭВИ антенна НАП «Аппаратура ПС» была установлена на Контрольной точке № 2 АО «ГНИНГИ» на расстоянии порядка 1 м в плане от центра Опорного пункта, на котором была установлена антенна НАП «EFT S2» (рис. 28).



Рис. 28. «Аппаратура ПС» в процессе установки на Контрольной точке (фото авторов)

Получение ассистирующей информации (уточнённых эфемерид и поправок часов) навигационных спутников от сервера СВО ЭВИ Hi-RTPTM осуществлялось по сети интернет в формате RTCM версии 3.2. Для этой цели НАП «Аппаратура ПС» был подключен через коммутатор к серверу сети интернет АО «ГНИНГИ» посредством выделенной линии витой пары категории 5е, аналогично ранее подключенному «EFT S2». Для статистической обработки результатов наблюдений, полученных НАП «Аппаратура ПС» использовалось специализированное ПО «STOREGIS», версия 8.5.27.0.

Всего за период параллельного тестирования были получены 5 серий наблюдений «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, обозначенные как Г-1 – Г-5. Результаты их обработки приведены в табл. 6.

### 4.4. Результаты статистической обработки серий наблюдений НАП «Аппаратура ПС» / СВО ЭВИ

«Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ выдаёт стандартное PPP-решение без разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, которое называют PPP с «плавающими» фазовыми неоднозначностями / Float PPP или PPP Float. На экране ПО «STOREGIS» PPP Float решение отображается как RTK Float и выделяется красным цветом. В связи с этим для исключения разночтений далее в таблицах и в тексте тип решения PPP Float будем обозначать как PPP/RTK Float.

При практическом применении метода PPP пользователи часто сами определяют уровень точности для определения сходимости. Учитывая ожидаемую точность «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, авторы выбрали уровень равный 0,2 м, т. е. началом каждой серии выбирался момент пересечения на «мишени» ПО «STOREGIS» окружности с радиусом 0,2 м или менее. При этом центр окружности соответствовал координатам точки установки антенны НАП «Аппаратура ПС»/контрольной точки. Завершались серии в момент «выброса» или потери PPP-решения. При плавном «уходе» за пределы круга с возвратом PPP-решений обратно серия не прекращалась, но при этом росла величина СКП. Такой плавный «уход» до 0,3 м от контрольной точки, например, наблюдался в серии Г-1.

**Таблица 6. Результаты обработки серий наблюдений «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ**

| №   | Период PPP/RTK Float серии (без инициализации) UTC |                | Продолжительность серии (час: мин) | Количество PPP Float решений в серии PPP/ Всего / Процент | Отклонение от координат Контрольной точки № 2 |         |             |             | СКП решения PPP/RTK Float (P 95%) |       |
|-----|--|----------------|------------------------------------|---|---|---------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------|
|     | Начало   | Конец          |                                    |   | delta B                                       | delta L | delta 2D(м) | delta H (м) | 2D (м)                            | H (м) |
| Г-1 | 18.09<br>14:50                                     | 19.09<br>00:43 | 09:53                              | 35605/ 35605/ 100   | 0",000  | +0",005 | 0,084       | +0,049      | 0,317                             | 0,339 |
| Г-2 | 19.09<br>16:58                                     | 20.09<br>07:29 | 14:31                              | 52299/ 52299/ 100   | +0",001                                       | +0",002 | 0,030       | +0,030      | 0,120                             | 0,157 |
| Г-3 | 20.09<br>09:18                                     | 24.09<br>08:59 | 95:41                              | 344464/ 344464 /100                                       | +0",001                                       | +0",002 | 0,035       | +0,050      | 0,123                             | 0,161 |
| Г-4 | 24.09<br>09:13                                     | 24.09<br>10:50 | 01:37                              | 5835/ 5835/ 100   | -0",001                                       | +0",004 | 0,079       | +0,159      | 0,202                             | 0,281 |
| Г-5 | 24.09<br>11:07                                     | 25.09<br>10:41 | 23:26                              | 84829/ 84829/ 100   | 0",000  | +0",003 | 0,044       | +0,023      | 0,162                             | 0,150 |

Самой продолжительной серией наблюдений «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, стала серия Г-3, которая непрерывно продолжалась четверо суток (без 19 минут) с 09:18 20.09.2024 до 08:59 24.09.2024 г. (табл. 6). Результаты статистической обработки серии Г-3 приведены на рис. 29.

Как видно на рис. 29, начальное PPP-решение серии Г-3, выбранное авторами, чётко совпадает с окружностью с радиусом 0,20 м, и все 344464 решения (100 %) PPP/RTK Float расположены в пределах круга этого радиуса. Обратим внимание на «шлейф» от начального решения серии Г-3 до расстояния примерно равного 0,1 м до центра «мишени». Данный «шлейф» указывает на завершающий участок процесса итерации. Также отметим наличие сигналов спутников SBAS (обозначены зелёным цветом в шкале сигнал/шум), которые в вычислении PPP/RTK Float решений не участвуют. При этом отсутствуют сигналы спутников ГНСС БЕЙДОУ, приём которых, как выяснилось, был отключён у НАП «Аппаратура ПС» специалистами АО «КБ НАВИС» для (по их предположению) улучшения точности. В результате в период проведения первых трёх серий (Г-1 – Г-3) сигналы спутников ГНСС БЕЙДОУ не принимались НАП «Аппаратура ПС», и вычисления PPP/RTK Float решений осуществлялось по спутникам трёх ГНСС GPS/ГЛОНАСС/ГАЛИЛО без ГНСС БЕЙДОУ. По просьбе авторов перед началом серии Г-4 приём сигналов ГНСС БЕЙДОУ был штатно подключён.

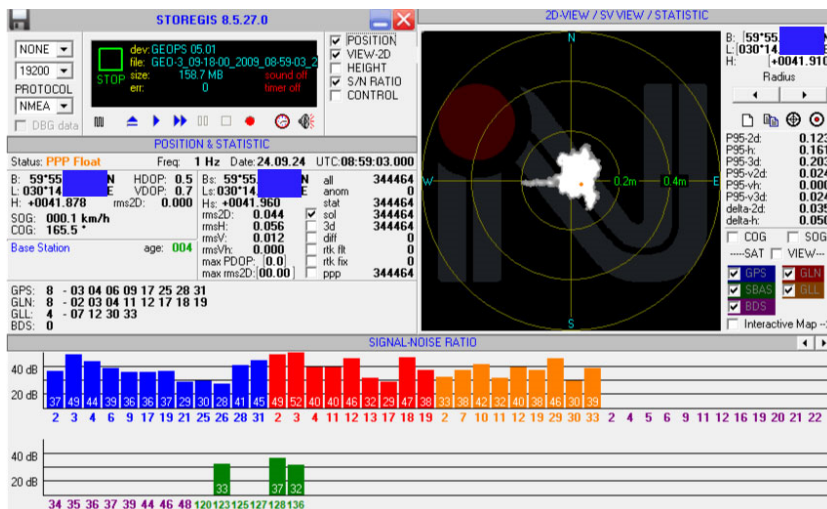


Рис. 29. Результаты серии Г-3 «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ от 24.09.2024 г. СКП 2D (P95 %) = 0,123 м.  $R_{\min}$  круга «мишени» составляет 0,20 м (20 см)

На рис. 30 представлены результаты заключительной серии Г-5 «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, с завершением которой закончились все наблюдения 2024 года.

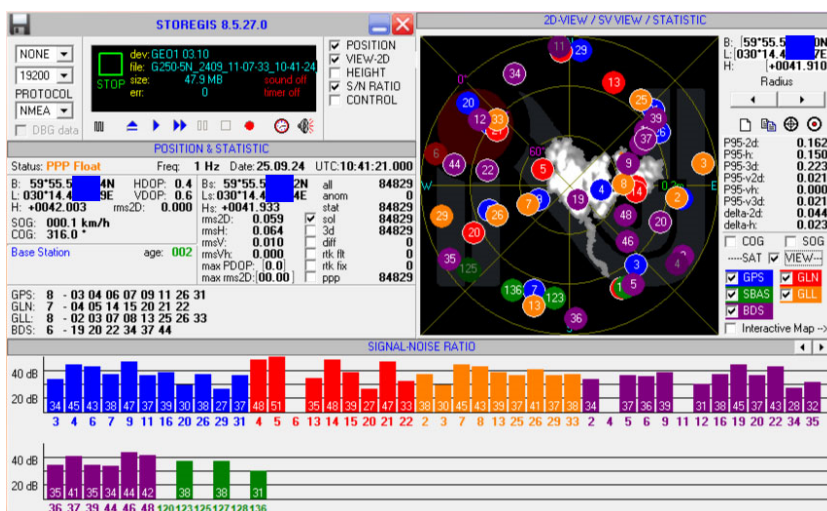


Рис. 30. Результаты серии Г-5 «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ от 25.09.2024 г. СКП 2D (P95 %) = 0,162 м.  $R_{\min}$  круга «мишени» составляет 0,10 м (10 см)

Здесь также отчётливо видно, что начальное PPP-решение серии Г-5, выбранное авторами, совпало с окружностью радиусом 0,20 м (вторая окружность по 0,10 м каждая). «Шлейф» от начального решения серии Г-5 также тянется примерно до расстояния 0,1 м от центра «мишени», что указывает на завершающий участок итерации. Все 84829 решений (100 %) расположены в пределах круга радиусом 0,20 м. Наблюдается наличие сигналов спутников SBAS (обозначены зелёным цветом в шкале сигнал/шум и в виде зелёных кружочков с номерами спутников в южной части



мишени), которые в вычислениях решений не участвуют. Также НАП «Аппаратура ПС» помимо спутников GPS, ГЛОНАСС и ГАЛИЛЕО принимал сигналы от 17 спутников БЕЙДОУ, шесть из которых участвовали в вычислении PPP/RTK Float решений. Следует отметить, что добавление ГНСС БЕЙДОУ не привело к ухудшению СКП, но даже улучшило её значение по сравнению с серией Г-1 без БЕЙДОУ (0,162 м в серии Г-5 против 0,317 м в серии Г-1) (табл. 6).

### 5. Сравнение процентного соотношения количества высокоточных решений в одинаковые периоды параллельных серий «EFT S2»/Hi-RTPTM и «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ

Как было отмечено выше, за счёт сравнения параллельных серий, выполненных НАП «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ и НАП «EFT S2»/Hi-RTPTM, расположенных в одном месте, и при абсолютно одинаковых условиях авторы хотели оценить возможное влияние уровня корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервиса Hi-RTPTM и точность получаемых результатов. Для этой цели были сформированы и повторно обработаны парные группы параллельных серий (или их участков), совпадающих по времени и периоду наблюдений. Результаты обработки этих групп серий, «приведенных» к единому времени наблюдений, представлены в табл. 7.

**Таблица 7. Результаты обработки парных групп серий «EFT S2»/Hi-RTPTM и «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, «приведенных» к единому времени**

| №         | Период PPP/RTK серии (без инициализации) UTC |             | Продолжительность серии (час:мин) | Количество PPP решений в серии PPP/ Всего / Процент | Отклонение от координат Контрольной точки № 2 |         |             |             | СКП решения PPP/RTK (P 95%) |       |
|-----------|--|-------------|-----------------------------------|---|---|---------|-------------|-------------|-----------------------------|-------|
|           | Начало                                       | Конец       |                                   |   | delta B                                       | delta L | delta 2D(м) | delta H (м) | 2D (м)                      | H (м) |
| 3.9 Г1    | 18.09 14:50                                  | 19.09 00:43 | 09:33                             | 6672/ 35359/ 19                                     | -0",001                                       | +0",001 | 0,036       | -0,038      | 0,099                       | 0,135 |
| Г-1       | 18.09 14:50                                  | 19.09 00:43 | 09:33                             | 35605/ 35605/ 100                                   | 0",000  | +0",005 | 0,084       | +0,049      | 0,317                       | 0,339 |
| 3.10 Г2   | 19.09 16:58                                  | 20.09 07:29 | 14:31                             | 16074/ 51616/ 31                                    | -0",001                                       | 0",000  | 0,030       | -0,051      | 0,091                       | 0,115 |
| Г-2       | 19.09 16:58                                  | 20.09 07:29 | 14:31                             | 52299/ 52299/ 100                                   | 0",000  | +0",002 | 0,030       | +0,030      | 0,120                       | 0,157 |
| 3.11 Г3.1 | 20.09 14:05                                  | 22.09 22:51 | 56:46                             | 62768/ 200587/ 31                                   | 0",000  | -0",001 | 0,026       | -0,061      | 0,113                       | 0,180 |
| Г-3.1     | 20.09 14:05                                  | 22.09 22:51 | 56:46                             | 204358/204358/ 100                                  | +0",001                                       | +0",002 | 0,041       | +0,060      | 0,128                       | 0,177 |
| 3.12 Г3.2 | 23.09 00:36                                  | 24.09 08:59 | 32:23                             | 50998/ 115254/ 44                                   | -0",001                                       | -0",001 | 0,020       | -0,028      | 0,095                       | 0,106 |
| Г-3.2     | 23.09 00:36                                  | 24.09 08:59 | 32:23                             | 116131/116131/100                                   | +0",001                                       | +0",001 | 0,027       | +0,035      | 0,106                       | 0,129 |
| 3.12 Г4   | 24.09 09:13                                  | 24.09 10:50 | 01:37                             | 4512/ 5651/ 80                                      | -0",001                                       | -0",002 | 0,051       | -0,036      | 0,140                       | 0,096 |
| Г-4       | 24.09 09:13                                  | 24.09 10:50 | 01:37                             | 5835/ 5835/ 100                                     | -0",001                                       | +0",004 | 0,079       | +0,159      | 0,202                       | 0,281 |
| 3.12 Г5.1 | 24.09 11:07                                  | 24.09 18:21 | 07:14                             | 12330/ 25753/ 48                                    | -0",001                                       | 0,000   | 0,028       | -0,066      | 0,442                       | 0,266 |
| Г-5.1     | 24.09 11:07                                  | 24.09 18:21 | 07:14                             | 26042/ 26042/ 100                                   | 0",000  | +0",003 | 0,044       | +0,023      | 0,162                       | 0,150 |
| 3.13      | 24.09 18:51                                  | 25.09 00:05 | 05:14                             | 11877/ 18597/ 64                                    | -0",001                                       | -0",002 | 0,056       | -0,022      | 0,367                       | 0,300 |
| Г-5.2     | 24.09 18:51                                  | 25.09 00:05 | 05:14                             | / 84829/ 100  | 0",000  | +0",003 | 0,044       | +0,023      | 0,162                       | 0,150 |

Необходимо отметить, что в качестве высокоточных решений для «EFT S2»/Hi-RTPTM выбраны все PPP Фикс/RTK Int решения в каждой «приведенной» серии, так как по технологии получения и вычисления эти решения являются высокоточными по умолчанию, а также более точными, чем стандартные PPP/RTK Float решения «EFT S2»/Hi-RTPTM. В качестве высокоточных решений для НАП «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ выбраны все решения в «приведенных» сериях, попавшие в круг радиусом 0,2 м, выбранного авторами в качестве уровня точности для определения сходимости PPP/RTK Float решений. Отметим, что количество высокоточных решений во всех «приведенных» сериях «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ составляет согласно данному критерию 100 %.

Пример получения «приведенных» пар серий «EFT S2»/Hi-RTPTM и «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ на основе серий 3,10 и Г-2 представлен ниже. Серия 3,10 «EFT S2»/Hi-RTPTM (начало – 19.09 в 02:37 и окончание – 12.09 в 07:44) целиком перекрывает по времени серию Г-2 «Аппаратура ПС»/СВО (начало – 24.09 в 16:58 и окончание – 20.09 в 07:29). Поэтому файл с зарегистрированными данными серии 3.10 «обрезается» и «приводится» к времени начала и окончания серии Г-2. Приведенный файл обозначается как 3.10Г2, где нижний индекс означает, что серия 3.10 «приведена» по времени к серии Г-2. Результаты обработки «приведенной» серии 3.10Г2 представлены на рис. 31.

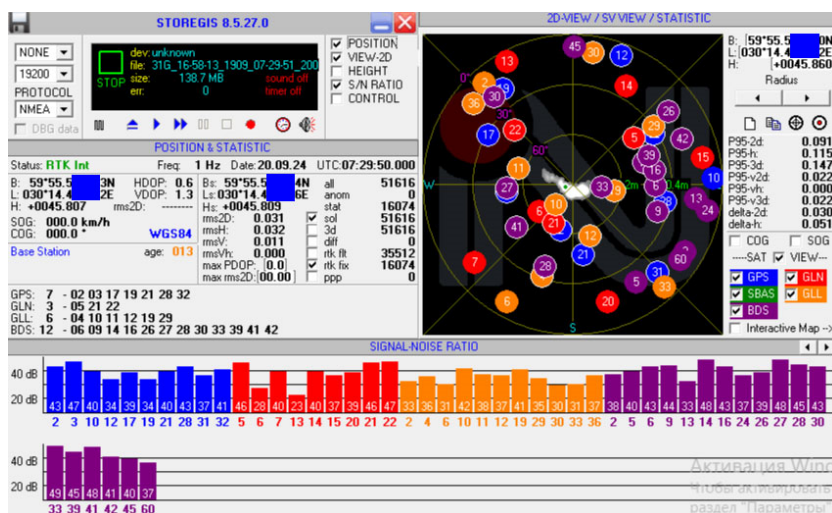


Рис. 31. Результаты обработки «приведенной» серии 3.10Г2 «EFT S2»/Hi-RTPTM, СКП 2D = 0,091 м.  $R_{min}$  круга «мишени» на рис. 31 составляет 0,20 м (20 см)

Остальные шесть пар серий «EFT S2»/Hi-RTPTM и «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ, «приведенных» к единому времени, сформированы по аналогичной методике. Рассмотрим результаты, представленные в табл. 7. Как отмечено выше, количество высокоточных решений во всех сериях «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ составляет 100 %. В то же время, процент соотношения высокоточных PPP Фикс/RTK Int решений к общему количеству решений в «приведенных» сериях «EFT S2»/Hi-RTPTM по результатам обработки «приведенных» серий составляет от 19 % до 80 % (табл. 7).

Подчеркнём, что в «приведенных» сериях «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ в аналогичные периоды и при одинаковых условиях наблюдений никаких «выбросов»

или ухудшения точности PPP-решений, которые проявились в ходе выполнения третьей группы серий «EFT S2»/Hi-RTP™, не наблюдалось. На основе этого авторы пришли к выводу, что корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервиса Hi-RTP™ и существенное ухудшение точности PPP Фикс/RTK Int решений как в плане, так и по высоте, в третьей группе серий «EFT S2»/Hi-RTP™, не усматривается.

#### 6. Оценка точности серий наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP™

Основной целью тестирования сервиса высокоточного позиционирования Hi-RTP™ компании Hi-Target была оценка точности PPP-AR решений с использованием первой из производимых в России НАП «EFT S2», оснащенной технологией получения PPP-решений с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений / PPP with integer ambiguity resolution, их статистическая обработка и оценка точности. Принимая во внимание неустойчивую работу НАП «EFT S2» / Hi-RTP™, вызванную, по мнению авторов, внешними факторами (усилением искусственных радиопомех) в ходе первой группы серий наблюдений, а также неизвестными причинами в ходе третьей группы серий, авторы приняли решение оценить точность наблюдений системы «EFT S2» / Hi-RTP™ выполнить только на основе серий со 100 % количеством PPP Фикс/RTK Int решений в каждой серии. Таких серий оказалось 14 (4 серии – из первой, 9 – из второй группы и 1 – из третьей группы серий). Серия третьей группы № 3.5 (табл. 4) с наивысшей СКП (P 95 %) = 0,016 м в плане, была исключена из оценки точности, так как она получена в режиме позиционирования «Статический», а не в режиме позиционирования «PPP Фикс Динамический», как все остальные тринадцать серий, отобранных для предварительной оценки точности «EFT S2»/Hi-RTP™ (табл. 8).

Принимая во внимание значительное расхождение количества PPP Фикс/RTK Int решений и значений СКП (P 95 %) в указанных сериях вычислим средневзвешенные значения СКП (P 95 %) как более объективную оценку точности PPP Фикс/RTK Int решений, чем средняя величина СКП.

Расчёт средневзвешенного значения СКП (P 95%) выполнен по формуле (1):

$$C_g = \frac{\sum a_i w_i}{\sum w_i} \quad (1)$$

где  $a_i$  – значения СКП (P 95 %) в каждой из серий 13 серий в табл. 8;

$w_i$  – количество PPP Фикс/RTK Int решений в серии под номером, соответствующим номеру серии «а».

Вычисленные по формуле (1) значения средневзвешенных значений СКП (P 95 %) PPP Фикс/RTK Int решений составили:

- СКП<sub>св</sub> (P 95 %) в плане: 0,076 м;
- СКП<sub>св</sub> (P 95 %) по высоте: 0,108 м.

Указанные значения СКП<sub>св</sub> соответствуют заявленным разработчиками характеристикам точности, составляющей для регионов за пределами Азиатско-Тихоокеанского региона 0,10 м в плане и 0,15 м по высоте [3].

**Таблица 8. Серии наблюдений НАП «EFT S2» / Hi-RTP, отобранные авторами для оценки точности наблюдений системы «EFT S2» / Hi-RTP™**

| № серии | Период PPP Фикс / RTK Integer серии (без инициализации) UTC |                | Продолжительность PPP/RTK-серии (час:мин.) | Количество PPP/RTK решений в серии Integer/ Всего/ Процент | Отклонение итогового решения PPP Фикс / RTK Int от координат Опорного пункта «POIN» |                 |              |               | СКП решения PPP Фикс / RTK Integer (P 95 %) |              |
|---------|---|----------------|--|--|---|-----------------|--------------|---------------|---|--------------|
|         | Начало  | Конец          |  |  | delta B   | delta L         | delta 2D(м)  | delta H (м)   | 2D (м)                                      | H (м)        |
| 1.1     | 10.07<br>12:17  | 10.07<br>12:51 | 00:34                                      | 2029 / 2031 / 100  | 0",000  | 0",000          | 0,015        | -0,127        | 0,054                                       | 0,178        |
| 1.2     | 10.07<br>12:57  | 10.07<br>13:54 | 00:57                                      | 3440 / 3440 / 100  | 0",000  | -0",001         | 0,013        | -0,108        | 0,032                                       | 0,128        |
| 1.3     | 10.07<br>14:44  | 10.07<br>16:03 | 01:19                                      | 6541 / 6541 / 100  | -0",001   | +0",001         | 0,018        | -0,059        | 0,043                                       | 0,089        |
| 1.8     | 13.07<br>10:13  | 13.07<br>12:35 | 02:22                                      | 8571 / 8571 / 100  | -0",001   | -0",001         | 0,029        | -0,061        | 0,071                                       | 0,086        |
| 2.3     | 03.08<br>16:55  | 06.08<br>14:54 | 69:59                                      | 250088 / 250250 / 100                                      | 0",000  | 0",000          | 0,028        | -0,037        | 0,079                                       | 0,105        |
| 2.4     | 06.08<br>14:57  | 08.08<br>00:06 | 44:46                                      | 119326 / 119326 / 100                                      | -0",001   | 0",000          | 0,025        | -0,041        | 0,080                                       | 0,118        |
| 2.5     | 09.08<br>07:14  | 11.08<br>04:00 | 56:03                                      | 159930 / 159930 / 100                                      | -0",001   | +0",001         | 0,030        | -0,029        | 0,084                                       | 0,115        |
| 2.6     | 11.08<br>06:32  | 13.08<br>14:36 | 56:04                                      | 200357 / 200358 / 100                                      | -0",001   | -0",001         | 0,018        | -0,039        | 0,070                                       | 0,108        |
| 2.7     | 13.08<br>22:57  | 15.08<br>23:37 | 48:40                                      | 175191 / 175193 / 100                                      | -0",001   | 0",000          | 0,022        | -0,039        | 0,073                                       | 0,116        |
| 2.8     | 15:08<br>23:42  | 22.08<br>20:08 | 164:26                                     | 591572 / 591572 / 100                                      | -0",001   | 0",000          | 0,021        | -0,025        | 0,070                                       | 0,108        |
| 2.9     | 22.08<br>20:09  | 24.08<br>09.51 | 37:42                                      | 135365 / 135365 / 100                                      | -0",001   | +0",001         | 0,024        | -0,031        | 0,072                                       | 0,102        |
| 2.10    | 24.08<br>14:49  | 25.08<br>11:07 | 20:18                                      | 73078 / 73078 / 100  | 0",000  | 0",000          | 0,015        | -0,026        | 0,050                                       | 0,082        |
| 2.11    | 25.08<br>12:12  | 26.08<br>11:55 | 23:43                                      | 85152 / 85152 / 100  | -0",001   | +0",001         | 0,025        | -0,034        | 0,064                                       | 0,112        |
|         |   |                |  | <b>Общее кол-во PPP Фикс/RTK Integer решений</b>           | <b>Средние отклонения PPP/RTK Integer от координат Опорного пункта «POIN»</b>       |                 |              |               | <b>Средние значения СКП (P 95 %)</b>        |              |
|         |   |                |  | <b>1 810 640</b>   | <b>-0",0007</b>   | <b>-0",0001</b> | <b>0,022</b> | <b>-0,050</b> | <b>0,065</b>                                | <b>0,111</b> |

### Заключение

Тестирование Глобального PPP-сервиса высокоточного позиционирования в режиме реального времени Hi-RTP™, разработанного компанией «Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd.» (КНР), выполнено с использованием отечественной НАП «EFT S2» производства ООО «ЕФТ Сервис», г. Москва, в период с 10 июля по 25 сентября 2024 г. Основная задача тестирования заключалась в оценке точности PPP-AR

решений с использованием первой из производимых в России НАП, оснащенной технологией получения PPP-решений с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений / PPP with integer ambiguity resolution (PPP-AR), их статистическая обработка и оценка точности. В ходе тестирования получено 13 серий наблюдений со 100 % количеством таких PPP-AR решений в режиме «EFT S2»/Hi-RTPTM «PPP Фикс Динамический» и одна серия – в режиме позиционирования «Статический». С целью оценки возможного влияния уровня корреляции фактора внешних помех на устойчивость работы сервиса Hi-RTPTM в период с 18 по 25 сентября 2024 г. параллельно с пятью заключительными сериями наблюдений «EFT S2»/Hi-RTPTM» были выполнены наблюдения с использованием отечественной навигационной аппаратуры геодезического класса точности «Аппаратура ПС», разработанной АО «КБ «НАВИС», подключенной к российскому PPP-сервису «Система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации», показавшие стабильную работу системы «Аппаратура ПС»/СВО ЭВИ в течение всего периода параллельных наблюдений.

По результатам выполненного тестирования «EFT S2»/Hi-RTPTM можно сделать следующие основные выводы:

1. Определенные на основе более 1 млн 810 тыс. PPP Фикс/RTK Int решений, полученных системой «EFT S2»/Hi-RTPTM (табл. 8), средневзвешенные значения СКП<sub>св</sub> (P 95 %) составили в плане = 0,076 м и по высоте = 0,108 м. Эти значения СКП<sub>св</sub> (P 95 %) соответствуют заявленным разработчиками характеристикам точности для регионов за пределами Азиатско-Тихоокеанского региона (0,10 м в плане и 0,15 м по высоте) [3].

2. Средние из 13 серий наблюдений со 100 % количеством PPP Фикс/RTK Integer решений в режиме «EFT S2»/Hi-RTPTM отклонения от координат Опорного пункта «POIN» составили по широте «delta B» = -0",0007 и по долготе «delta B» = -0",0001 (табл. 8).

3. Вычисление высокоточных PPP Фикс/RTK Int решений выполняется НАП «EFT S2» преимущественно по ГНСС GPS, ГАЛИЛЕО и БЕЙДОУ без учёта или при минимальном количестве (от 0 до двух) учитываемых спутников ГНСС «ГЛОНАСС» даже при 9 «видимых» спутниках ГЛОНАСС.

Авторы считают, что отсутствие или минимальное количество спутников ГЛОНАСС в PPP Фикс / RTK Int решениях может быть связано со сложностью корректного решения задачи разрешения целочисленных неоднозначностей фазовых измерений по ГНСС «ГЛОНАСС» в мультисистемных приёмниках ГНСС различных производителей, входящих в состав сети базовых станций провайдера PPP-услуги Hi-RTPTM.

4. Возраст корректирующих поправок, поступающих от сервера Hi-RTPTM по сети интернет, весь период наблюдений составлял 12–16 секунд, что является нормальным показателем. Задержек или «исчезновения» корректирующих поправок от сервера Hi-RTPTM в период тестирования зафиксировано не было.

В заключение необходимо отметить, что по результатам тестирования «EFT S2»/Hi-RTPTM авторы статьи и представители компании «EFT Group» в Санкт-Петербурге пришли к пониманию необходимости и достигли предварительной договорённости о проведении в весенне-летний период 2025 г. второго этапа тестирования «EFT S2»/Hi-RTPTM после обновления ПО НАП «EFT S2».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смолин В. М., Решетняк С. В., Онищенко О. Л. Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории СМП в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть I. Системы передачи дифференциальных корректирующих поправок и проблемы высокоточного координирования в акватории Северного морского пути в условиях санкционных ограничений // *Навигация и гидрография*. – 2022. – № 69. – С. 7–25.
2. Global Correction Service. Интернет-портал компании Hi-Target Surveying Instrument Co. Ltd. URL: <https://en.hi-target.com.cn/industries-hi-target/global-correction-service> Последнее обращение 23.11.2024.
3. Церемония запуска системы глобального сервиса точного позиционирования в реальном времени Hi-RTP компании Hi-Target, Пекин, 22 мая 2019. 10-я Китайская конференция по спутниковой навигации на тему «Навигация – 10 лет и более», Пекин, 22-25 мая 2019. URL: <http://www.demetra5.kiev.ua/ru/info/articles/Hi-RTP>. Последнее обращение 24.08.2023.
4. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK. *Measurement Science and Technology*, 34 (2023), 11 pp. IOP Publishing, 2023. URL: <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-022-00089-9>. Последнее обращение 28.11.2024.
5. Grinter T., Roberts C., Janssen V. Ambiguity-Resolved Real-Time Precise Point Positioning as a Potential Fill-In Service for Sparse CORS Networks // *Journal of Surveying Engineering*. – 146(2):04020007. – May 2020. DOI:10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000314. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341176865\\_Ambiguity-Resolved\\_Real-Time\\_Precise\\_Point\\_Positioning\\_as\\_a\\_Potential\\_fill-In\\_Service\\_for\\_Sparse\\_CORS\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/341176865_Ambiguity-Resolved_Real-Time_Precise_Point_Positioning_as_a_Potential_fill-In_Service_for_Sparse_CORS_Networks). Последнее обращение 28.08.2024.
6. Hirokawa R., Fernández-Hernández I., Reynolds S. PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message // *Navigation*. – 2021. – Vol. 68. – Pp. 759–778. DOI: 10.1002/navi.452. URL: [PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message](https://doi.org/10.1002/navi.452) Последнее обращение 28.08.2024.
7. Xingxing Li, Jiaxin Huang, Xin Li, Zhiheng Shen, Junjie Han, Linyang Li and Bo Wang. Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities // *Satellite Navigation*. – 2022. Vol. 3 (28). – 22 pp. URL: <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-022-00089-9> Последнее обращение 29.11.2024.
8. Pengyu Hou, Jiuping Zha, Teng Liu. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK // *IOP Publishing, Measurement Science and Technology*. – 2023. – No 34(5). – 11 pp. DOI:10.1088/1361-6501/acb78c Последнее обращение 30.11.2024.
9. What is Hi-RTP. Интернет-портал Gold. URL: <https://www.cqtopgeo.com/info/what-is-hi-rtp-34942053.html> Последнее обращение 29.11.2024.
10. Сайт сети базовых станций CORS. Электронный ресурс: <https://eft-cors.ru/>. Последнее обращение 30.11.2024.
11. 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.
12. IGS State Space Representation (SSR) Format Version 1.00. Сайт Международной службы ГНСС IGS [https://files.igs.org/pub/data/format/igs\\_ssr\\_v1.pdf](https://files.igs.org/pub/data/format/igs_ssr_v1.pdf) Последнее обращение 23.11.2024.
13. Приёмник EFT S2. Сайт компании «EFT Group», раздел ГНСС оборудование. URL: [https://eftgroup.ru/catalog/gnss\\_oborudovanie/gnss\\_priemniki/priemnik\\_eft\\_s2/?oid=3116](https://eftgroup.ru/catalog/gnss_oborudovanie/gnss_priemniki/priemnik_eft_s2/?oid=3116) Последнее обращение 23.11.2024.
14. Glaner M., Weber R. PPP with integer ambiguity resolution for GPS and Galileo using satellite products from different analysis centers // *GPS Solutions*. – 2021. Vol. 25. – Article number 102. doi.org/10.1007/s10291-021-01140-z. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-021-01140-z>. Последнее обращение 29.08.2023.
15. Брагинцев В. Ф., Сухой Ю. Г., Бурдин И. А., Мещеряков В. М. Первые результаты эксплуатации системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей и перспективы ее дальнейшего развития // *Труды Института прикладной астрономии РАН*. – 2017. – Вып. 42. С. 41–48.
16. Система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации. Сайт СВО ЭВИ. <https://glonass-svoevi.ru/> Последнее обращение 04.12.2024.
17. Сайт АО «Конструкторское бюро навигационных систем», Санкт-Петербургский филиал. [http://navis.inwin.ru/index.shtml?geo\\_priem.txt](http://navis.inwin.ru/index.shtml?geo_priem.txt). Последнее обращение 5.12.2024.

*ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS*

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

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

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

*Sergey V. RESHETNYAK*, Chief Scientist – advisor to the Director General of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, DSc, e-mail: svr@gningi.ru.

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

*Denis F. MILYAKOV*, 1<sup>st</sup> category engineer, Scientific Center of Applied Electrodynamics, JSC, CandSc, e-mail: denism@navis.ru.

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

*Oleg L. ONISHCHENKO*, Director General, Navgeocom DifService Group LLC, e-mail: seadgps@mail.ru.

УДК 351/354+359

**О РЕАЛИЗАЦИИ ОСНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ В ОБЛАСТИ  
ВОЕННО-МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДО 2030 ГОДА**

**Пискун С. А.<sup>1</sup>, Попов А. М.<sup>2</sup>, Безгодков А. В.<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Главное командование Военно-Морского Флота.

*Аннотация.* В статье показана значимость Основ государственной политики в области военно-морской деятельности Российской Федерации на период до 2030 года (далее – Основы) как документа стратегического планирования Российской Федерации, а также описаны основные этапы подготовки доклада Президенту Российской Федерации по реализации Основ.

*Ключевые слова:* национальная морская политика Российской Федерации, стратегическое планирование, военно-морская деятельность Морская доктрина Российской Федерации, государственная политика Российской Федерации в области военно-морской деятельности.

*Для цитирования:* Пискун С. А., Попов А. М., Безгодков А. В. О реализации Основ государственной политики в области военно-морской деятельности Российской Федерации до 2030 года // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 75–80.

**ON THE IMPLEMENTATION OF THE FOUNDATIONS OF STATE POLICY IN  
THE FIELD OF NAVAL ACTIVITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION  
UNTIL 2030**

**Piskun S. A.<sup>1</sup>, Popov A. M.<sup>2</sup>, Bezgodov A. V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

<sup>2</sup>Main Command of the Navy

*Abstract.* The article highlights the significance of the Foundations of State Policy in the Field of Naval Activities of the Russian Federation for the period until 2030 as a strategic planning document of the Russian Federation. It also describes the main stages in preparing the report to the President of the Russian Federation on the implementation of the Foundations.

*Keywords:* national maritime policy of the Russian Federation, strategic planning, naval activities, Maritime Doctrine of the Russian Federation, state policy of the Russian Federation in the field of naval activities.

*For citation:* Piskun S. A., Popov A. M., Bezgodov A. V. On the Implementation of the Foundations of State Policy in the Field of Naval Activities of the Russian Federation Until 2030 // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 75–80.

Значение Мирового океана для Российской Федерации и всего мира постоянно возрастает. Истощение природных ресурсов суши, обострило конкурентную борьбу за стратегические запасы полезных ископаемых, находящихся в недрах морей и океанов.

Богатства, скрытые в Мировом океане, имеют ключевое значение для социально-экономического развития Российской Федерации, которое в будущем



невозможно без развития морского потенциала страны. В свою очередь, способность государства отстаивать свои национальные интересы в Мировом океане зависит от устойчивого развития морской деятельности и прежде всего способности их защитить, от состояния ее «силовой» составляющей – военно-морской деятельности.

Военно-морская деятельность – это целенаправленная деятельность государства по формированию и поддержанию военными методами благоприятных условий в Мировом океане для устойчивого развития Российской Федерации и реализации основных приоритетов ее национальной безопасности.

Изменившаяся расстановка сил на геополитической арене мира с начала XXI века потребовала соответствующей реакции со стороны политического руководства Российской Федерации. Так, 17 июня 2015 года произошло знаменательное событие в современной истории Российской Федерации – Президентом Российской Федерации В. В. Путиным была утверждена Морская доктрина Российской Федерации (далее – Морская доктрина) [1]. Являясь документом стратегического планирования, она отразила официальные взгляды руководства страны на национальную морскую политику России в условиях изменившейся геополитической обстановки в мире, особенно после событий 2014 года, связанных с возвращением Крыма в состав Российской Федерации.

20 июля 2017 г. Указом Президента Российской Федерации № 327 были утверждены «Основы государственной политики в области военно-морской деятельности Российской Федерации на период до 2030 года» (далее – Основы) [2], которые определили цели, задачи, приоритетные направления и механизмы реализации этой сферы деятельности государства, направленной на обеспечение реализации национальных интересов России в Мировом океане.

Основы являются документом стратегического планирования Российской Федерации и конкретизируют отдельные положения не только Морской доктрины, но и Стратегии национальной безопасности Российской Федерации [3], Концепции внешней политики Российской Федерации, Военной доктрины Российской Федерации [4] и ряда других документов стратегического планирования, затрагивающих военную сферу.

Так как военно-морская деятельность является составной частью военной деятельности государства, осуществляемой в Мировом океане в целях предотвращения агрессии против России, то основными инструментами ее осуществления являются Военно-Морской Флот и органы ФСБ России. В осуществлении военно-морской деятельности принимает также участие МИД России и другие федеральные органы исполнительной власти и органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации в пределах их полномочий.

Разработка Основ осуществлялась Минобороны России, ответственным за разработку было определено Главное командование Военно-Морского Флота. Проведением научных исследований и разработкой проекта Основ занимался Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (АО «ГНИНГИ»), который имеет богатый опыт исследований по разработке нормативных правовых документов и документов стратегического планирования в сфере морской деятельности.

Разработанный проект Основ был согласован всеми заинтересованными федеральными органами исполнительной власти Российской Федерации (далее – ФОИВ), руководством Минобороны России, одобрен и поддержан Морской коллегией

при Правительстве Российской Федерации, аппаратом Совета Безопасности Российской Федерации и представлен Правительством Российской Федерации Президенту Российской Федерации В. В. Путину на утверждение.

Необходимо отметить, что официальное опубликование Основ было встречено эмоциональной и неоднозначной реакцией со стороны правящих элит и средств массовой информации «коллективного запада». Российскую Федерацию обвиняли и в «бряцании оружием», и «в необоснованных претензиях на стратегически важные районы Мирового океана». Кроме того, например, подвергалось сомнению положение статьи 39 Основ, о закреплении роли Военно-Морского Флота России на втором месте в мире по боевым возможностям. Негативную реакцию также вызвало содержание статей 37 и 51 б, в которых представлены положения о роли и возможностях нестратегического ядерного оружия, и другие. Отмеченное, на наш взгляд, подтверждает правильность принятого документа и свидетельствует в его пользу, как действительно значимого нормативного правового акта в системе национальной безопасности России и обеспечения международной стратегической стабильности.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 20 июля 2017 г. № 327 Правительству РФ было поручено обеспечить реализацию Основ. В свою очередь, Правительство Российской Федерации определило Минобороны России в качестве головного исполнителя среди ФОИВ за его реализацию. Ответственным за подготовку ежегодного доклада по реализации Основ было определено Главное командование ВМФ как самый компетентный орган военного управления Минобороны России по вопросам военно-морской деятельности. В целях проведения всестороннего анализа исходных данных в обеспечение военно-морской деятельности, научных исследований и подготовки на их основе предложений в проект доклада был привлечен научно-исследовательский потенциал АО «ГНИНГИ» – головной разработчик научного обоснования проекта Основ.

Необходимо отметить, что в АО «ГНИНГИ» был специально разработан научно-методический аппарат комплексной оценки реализации государственной политики в области военно-морской деятельности (далее – научно методический аппарат). В ходе исследований в интересах разработки научно-методического аппарата были определены показатели и критерии эффективности комплексной оценки реализации государственной политики в области военно-морской деятельности, а также разработаны рекомендации по правилам осуществления мониторинга и контроля реализации Основ и методические указания по подготовке ежегодного доклада Президенту Российской Федерации по реализации Основ. Разработанный научно-методический аппарат по результатам апробации был поддержан научно-экспертным советом Морской коллегии и утвержден главнокомандующим ВМФ.

Кроме того, в рамках исследований была разработана структура ежегодного доклада по реализации Основ, включающая в себя два основных раздела.

В первом разделе отражаются результаты анализа и содержание мероприятий, направленных на выполнение основных задач государственной политики в области военно-морской деятельности:

- в сфере обороны и национальной безопасности;
- в сфере государственной и общественной безопасности;
- в экономической сфере;
- в сфере внешнеполитической деятельности;
- в сфере науки, технологий и образования;

- в сфере экологической безопасности и рационального природопользования;
- в сфере стратегической стабильности;
- в сфере социального обеспечения и комплектования Военно-Морского Флота и органов федеральной службы безопасности.

Во втором разделе приводится оценка показателей эффективности мер по реализации государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности, исходя из оценок Минобороны России, ФСБ России, МИДа России с учетом вклада заинтересованных федеральных органов исполнительной власти.

В заключении ежегодного доклада делаются выводы об эффективности мер по реализации государственной политики в области военно-морской деятельности:

- обеспечивает ли уровень оснащённости ВМФ современным вооружением, военной и специальной техникой ему второе место в мире по боевым возможностям;
- способен ли ВМФ нанести ущерб флоту противника на уровне не ниже критического с применением нестратегического ядерного оружия;
- способен ли ВМФ в любых условиях обстановки применить морские стратегические ядерные силы;
- способен ли ВМФ нарастить военно-морскую группировку на опасном стратегическом направлении за счет межтеатрового маневра силами флотов в условиях ограниченного военного конфликта (вооруженного конфликта, локальной войны);
- способны ли органы ФСБ оперативно реагировать на изменения обстановки в исключительной экономической зоне и на континентальном шельфе Российской Федерации.

На основании выводов об эффективности мер по реализации государственной политики в области военно-морской деятельности делается заключение о состоянии национальной безопасности Российской Федерации в области военно-морской деятельности – обеспечивают ли состав, состояние и возможности Военно-Морского Флота, органов федеральной службы безопасности военную безопасность Российской Федерации с океанских и морских направлений, а также защиту национальных интересов Российской Федерации в Мировом океане.

Как отмечалось ранее, разработка ежегодного доклада осуществляется на основе анализа материалов, представляемых Минобороны России (ВМФ), ФСБ России, МИД России, Минпромторгом России, Минэкономразвития России, Минприроды России, МЧС России, Минобрнауки России, МВД России, Росгвардией, Государственной корпорацией «Росатом» и другими заинтересованными органами государственной власти Российской Федерации по реализации ими своих полномочий в сфере военно-морской деятельности.

Кроме того, в рамках исследований изучается и оценивается состояние военно-политической и стратегической обстановки в мире, состояние социально-экономического развития Российской Федерации применительно к военно-морской деятельности.

Также для подготовки доклада и отчетных материалов используются материалы СМИ, анализ которых выделен в специальный подраздел – «Освещение на постоянной основе военно-морской деятельности Российской Федерации, в том числе военно-морского присутствия сил (войск) ВМФ в стратегически важных районах Мирового океана».

В период с 2019 по 2024 годы были подготовлены доклады Президенту Российской Федерации по реализации Основ государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030, начиная с 2018 по 2023 год. Указанные документы были согласованы с руководством Минобороны России, поддержаны Научно-экспертным советом Морской коллегии при правительстве Российской Федерации и Морской коллегией при Правительстве Российской Федерации, рассмотрены Правительством Российской Федерации и представлены Президенту Российской Федерации. Необходимо отметить, что все представленные доклады получили высокую оценку со стороны указанных организаций и органов государственной власти.

Исходя из выводов, представленных в докладах за истекший период – состав, состояние и возможности Военно-Морского Флота, органов ФСБ России, обеспечивают военную безопасность Российской Федерации с океанских и морских направлений, а также защиту национальных интересов Российской Федерации в Мировом океане. Уровень оснащённости ВМФ современным вооружением, военной и специальной техникой обеспечивает ему второе место в мире по боевым возможностям. Особую роль в этом играет создание группировок современных атомных подводных крейсеров, являющихся основой морских стратегических ядерных сил, а также строительство современных подводных лодок и надводных кораблей-носителей высокоточного ракетного оружия большой дальности.

Динамично меняющаяся военно-политическая и стратегическая обстановка в мире, появление новых угроз национальной безопасности Российской Федерации, в том числе в Мировом океане, требуют пересмотра подходов и критериев в оценке Минобороны России, ФСБ России и других органов государственной власти по реализации ими своих полномочий в обеспечение национальных интересов Российской Федерации и реальной оценки их вклада в реализацию национальной морской политики России.

В 2024 году Морская коллегия Российской Федерации была подвергнута преобразованиям, по результатам которых полномочия Правительства Российской Федерации в части координации морской деятельности были переданы в администрацию Президента Российской Федерации – вновь сформированному Управлению Президента Российской Федерации по вопросам национальной морской политики. Данные изменения направлены на повышение эффективности деятельности Морской коллегии, в число главных задач которой входят защита национальных интересов России и укрепление ее обороноспособности в Мировом океане.

В интересах решения этой задачи Минобороны России на основе научных исследований, выполненных АО «ГНИНГИ», разрабатывается проект нового документа стратегического планирования – Основы государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности до 2035 года, который планируется представить на утверждение в 2025 году.

Подготовка новых Основ является одним из важнейших аспектов реализации Морской доктрины Российской Федерации утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31 июля 2022 года № 512.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Морская доктрина Российской Федерации: доктрина: утверждена Президентом РФ от 17 июня 2015 г. № Пр-1210 // Военное обозрение. – URL: topwar.ru.
2. Указ Президента РФ от 20 июля 2017 г. № 327 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года»: Указ // Москва: МОРКНИГА, 2018. –19 с.
3. Указ Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 г. № 400. «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Указ // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: publikation.pravo.gov.ru.
4. Указ Президента Российской Федерации от 25 декабря 2014 г. № Пр-2976 «О Военной доктрине Российской Федерации»: Указ // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: publikation.pravo.gov.ru.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*ПИСКУН Станислав Александрович*, начальник научно-исследовательского отдела Научно-исследовательского управления общесистемных проблем морской деятельности Российской Федерации АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат технических наук, e-mail: opmd@gningi.ru.

*Stanislav A. PISKUN*, Head of the Research Department of Systemic Problems of Maritime Activities, State Research Navigation and Hydrographic Institute, Candidate of Technical Sciences, e-mail: opmd@gningi.ru.

*ПОПОВ Андрей Михайлович*, ведущий советник оперативного управления Главного штаба Военно-Морского Флота, советник государственной гражданской службы Российской Федерации 1 класса, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: pm@mil.ru.

*Andrey M. POPOV*, Senior Advisor, Operations Directorate, Main Headquarters of the Navy, State Civil Service Advisor of the Russian Federation, 1st Class, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, e-mail: pm@mil.ru.

*БЕЗГОДОВ Александр Викторович*, заместитель начальника Научно-исследовательского управления общесистемных проблем морской деятельности Российской Федерации АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат военных наук, доцент, e-mail: opmd@gningi.ru.

*Alexander V. BEZGODOV*, Deputy Head of the Research Department of Systemic Problems of Maritime Activities, State Research Navigation and Hydrographic Institute, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, e-mail: opmd@gningi.ru.

# ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

---

УДК 528.47, 551.583

## ***К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ И ПОГРЕШНОСТЯХ РАСЧЁТА СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МОРЯ ПРИ ЭХОЛОТИРОВАНИИ***

**Мастрюков С. И.**

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

*Аннотация.* В работе дан ретроспективный обзор методов расчёта скорости вертикального зондирования моря, используемых при информационной поддержке эхолотирования. Оценена роль основных источников погрешности её расчёта. Показано, как на суммарную погрешность расчёта влияют методы расчёта скорости зондирования и степень вертикального разрешения исходных данных. Рекомендовано отказаться от устаревших методов расчёта скорости зондирования и перейти от практики гидрофизических измерений на «стандартных» горизонтах к более частым измерениям гидрофизических параметров. Оценены погрешности использования в качестве исходных климатических и прогностических данных о гидрофизических полях океана.

*Ключевые слова:* эхолотирование, средняя скорость звука при эхолотировании, методы и погрешности расчёта скорости эхолотирования.

*Для цитирования:* Мастрюков С. И. К вопросу о методах и погрешностях расчёта скорости вертикального зондирования моря при эхолотировании // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 81–93.

## ***ON THE METHODS AND ERRORS IN CALCULATING THE VERTICAL SOUNDING VELOCITY OF THE SEA DURING ECHO SOUNDING***

**Mastryukov S. I.**

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

*Abstract.* The paper provides a retrospective review of methods for calculating the vertical sounding velocity of the sea used for supporting echo sounding operations. The role of major error sources in its calculation is assessed. It is shown how the total calculation error is influenced by the methods of calculating the probing velocity and the degree of vertical resolution of the initial data. It is recommended to abandon outdated methods of calculating the sounding velocity and transitioning from the practice of conducting hydro-physical measurements at “standard” horizons to more frequent measurements of hydro-physical parameters. The errors of using climatic and forecast data on oceanic hydro-physical fields as input data are also evaluated.

*Keywords:* echo sounding, mean sound velocity during echo sounding, methods and errors in calculating sounding velocity.

*For citation:* Mastryukov S. I. On the methods and errors in calculating the vertical sounding velocity of the sea during echo sounding // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 81–93.

Для обозначения средней скорости вертикального зондирования моря в литературе используются разные и, как представляется, не совсем точные термины, например – «средняя скорость звука», «средняя вертикальная скорость звука» и др. Ниже будет использоваться термин скорость вертикального зондирования  $C_{ZOND}$ .

*Статья посвящена* использованию гидрофизической информации при информационной поддержке промерных работ с помощью эхолота. В связи с постоянным ростом требований к точности измерения глубин эхолотом объективно возрастают требования к точности:

- средств измерения гидрофизических параметров;
- методов косвенного расчёта скорости звука;
- методов расчёта скорости зондирования;
- исходных гидрофизических данных.

*Задачами* настоящей работы явились:

- обзор используемых на практике методов расчёта  $C_{ZOND}$ ;
- оценка их точности;
- оценка влияния разных факторов – степень разрешения данных о вертикальном распределении скорости звука (ВРСЗ), вид исходных данных (измерения, климат, прогноз) – на точность расчёта скорости зондирования.

*Актуальность* работы вызвана неоднозначностью действующих в Гидрографической службе (ГС) ВМФ рекомендаций [1, 2], а также продолжением дискуссии по вопросу учёта вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) при эхолотировании [3].

*Общие сведения.* Скорость звука в Мировом океане на поверхности может изменяться от 1406 до 1560 м/с, а на глубине 3000 м – от 1493 до 1555 м/с [4, 5]. То есть диапазон изменения скорости звука сравнительно невелик и не превышает 10 % от её средней величины. Из-за этого изменчивостью скорости звука сначала пренебрегали. Исторически первые эхолоты были настроены на постоянную скорость звука в диапазоне от 1460 до 1500 м/с, за счет чего невязка между результатами измерения глубины двумя эхолотами могла достигать почти 3 %  $((1500-1460)/1480)*100$ , а максимальная погрешность измерения, особенно в мелководных районах – 6 %  $((1500-1406)/1480)*100$ .

Впервые на нормативном уровне коррекция данных измерений эхолотом на скорость зондирования была реализована в Гидрографическом департаменте Английского Адмиралтейства в 1939 г. Именно тогда были опубликованы «Таблицы скорости звука в чистой и морской воде для использования при эхолотировании и эхолокации» [6]. В этих таблицах Мэтьюс Дж. Д. привёл средние арифметические (средневзвешенные) значения скорости звука  $\bar{C}$  в Мировом океане.

Средневзвешенные значения скорости звука использовались за рубежом, видимо, до 1960-х годов. С выходом в свет в 1970 г. в журнале *International Hydrographic Review* работы Маула и Бишоп [7] начался переход на использование средневзвешенной гармонической скорости звука  $\bar{C}_h$  (harmonic mean sound velocity).

В настоящее время в соответствии с действующим «Руководством по гидрографии» Международной гидрографической организации (МГО) [8] расчёт средней скорости зондирования при эхолокации рекомендуется осуществлять с использованием аналитической формулы для ВРСЗ, аппроксимируемого кусочно-линейной функцией, приведённой ниже.

В нашей стране для исправления глубин, измеренных эхолотом, вплоть до 1983 г. ГУНиО МО издавались специальные таблицы [1]. В этих таблицах по аналогии с Таблицами Адмиралтейства 1939 г. приводились значения средневзвешенной скорости звука. Параллельно согласно объяснению к табл. 2.11 издаваемых ГУНиО МО Мореходных таблиц [2] для расчёта поправки к измерениям эхолота в качестве  $C_{ZOND}$  было рекомендовано принимать скорость звука на половине глубины, измеренной эхолотом. Такая рекомендация не выдерживает критики.

В ряде отечественных работ в 1980-е годы, в том числе опубликованных в журнале, издаваемом ГУНиО МО, были рассмотрены методы расчёта скорости зондирования по наклонной трассе и предложено вместо средневзвешенной скорости звука использовать среднюю гармоническую скорость звука [9].

### Методы расчёта средней скорости зондирования

На рис. 1 приведены традиционные модели аппроксимации ВРСЗ  $V(z)$  при расчёте  $C_{ZOND}$ . Первая модель (ВРСЗ выделено синим цветом) – это модель многослойного океана с постоянными значениями скорости звука в каждом слое. Вторая модель (выделена красным цветом) и точнее отражающая форму ВРСЗ, основана на кусочно-линейной аппроксимации  $V(z)$  в каждом слое. Первая модель ВРСЗ используется для расчёта скорости зондирования, отождествляемой со средним взвешенным (средним арифметическим) и/или средним гармоническим значением скорости звука.

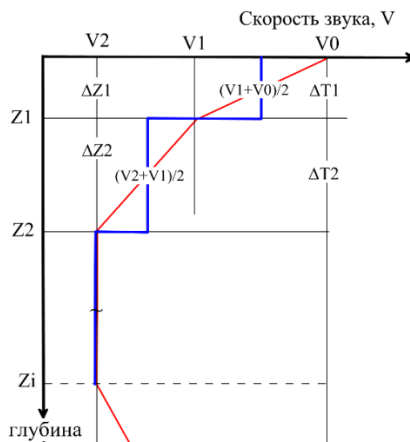


Рис. 1. Многослойная модель ВРСЗ (синяя линия) и кусочно-линейная аппроксимация ВРСЗ (красная линия)

Средняя арифметическая скорость звука, использованная Мэтьюсом при подготовке таблиц  $C_{ZOND}$  английского Адмиралтейства в 1939 г. [6], рассчитывается по формуле:

$$C_{ZOND} \cong \bar{C} = \frac{1}{Z} \int_0^Z V(z) \cdot dz \cong \frac{1}{2Z} \sum_0^n (V_i + V_{i-1}) \cdot (z_i - z_{i-1}). \quad (1)$$



В уравнении (1)  $\bar{C}$  – среднее арифметическое значение скорости звука в слое толщиной  $Z$ , соответствующем измеренной глубине места;  $V(z)$  – ВРСЗ;  $V_i$  – скорость звука,  $z_i$  – глубина на  $i$ -ом горизонте.

Средняя гармоническая скорость звука для многослойной модели ВРСЗ, которую начали использовать в 1960-е годы, рассчитывается по формуле:

$$C_{ZOND} \cong \bar{C}_h = \frac{Z}{T} = \frac{Z}{\int_0^Z \frac{dz}{V(z)}} \cong \frac{Z}{2 \sum_1^n \frac{z_i - z_{i-1}}{V_i + V_{i-1}}}. \quad (2)$$

Принципиальная разница между значениями средней взвешенной и средней гармонической скорости звука  $\bar{C}$  и  $\bar{C}_h$  заключается в том, что в первом случае весовые множители зависят от толщины этого слоя  $\Delta Z$ , а во втором – от времени прохождения сигнала через этот слой  $\Delta T$ .

Продемонстрируем разницу между двумя оценками скорости зондирования с помощью утрированного примера. Пусть в первом слое толщиной  $\Delta Z$  скорость звука равна 2000 м/с, а во втором слое толщиной  $2\Delta Z$  скорость составляет 1000 м/с. В таком случае по формуле (1) получим, что скорость зондирования во всей толще воды  $3\Delta Z$  составит 1333 м/с, а по формуле (2) – 1200 м/с. Хотя этот пример не отражает фактические океанические условия, он наглядно демонстрирует неточность использования средней взвешенной (средней арифметической) скорости звука (1).

Средняя скорости зондирования при кусочно-линейной аппроксимации ВРСЗ. Аппроксимируем функцию  $V(z)$  в каждом  $i$ -ом слое линейной функцией с постоянным вертикальным градиентом  $G$ :

$$V(z) = V_{i-1} + \frac{V_i - V_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \cdot z = V_{i-1} + G_i \cdot z, \dots z_{i-1} \leq z \leq z_i. \quad (3)$$

Время прохождения сигналом  $i$ -ого слоя определяется выражением:

$$\Delta T = \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{dz}{V} = \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{dz}{V_{i-1} + G_i \cdot z}.$$

Учитывая, что значение интеграла от приведённой в правой части рациональной функции точно известно для случая, когда  $V_i \neq V_{i-1}$  получим:

$$\Delta T = \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{dz}{V_{i-1} + G_i \cdot z} = \frac{1}{G_i} \ln(V_{i-1} + G_i \cdot z) \Big|_{z_{i-1}}^{z_i} = \frac{1}{G_i} (\ln V_i - \ln V_{i-1}) = \frac{1}{G_i} \ln \left( \frac{V_i}{V_{i-1}} \right), \dots V_i \neq V_{i-1}.$$

Для случая, когда  $V_i = V_{i-1}$  получим:

$$\Delta T = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{V_i}, \dots V_i = V_{i-1}.$$

Частное от деления глубины последнего горизонта  $Z_n$  на общее время прохождения сигнала от поверхности до этого горизонта и будет средней скоростью зондирования. Эту скорость назовем  $\bar{C}_a$  – «средней аналитической скоростью зондирования». Для нетривиального случая, когда  $V_i \neq V_{i-1}$ , выражение для расчёта этой скорости  $\bar{C}_a$  полностью соответствует формуле, рекомендованной для использования Международной гидрографической организацией (МГО) [8]:

$$C_{ZOND} = \bar{C}_a = \frac{Z}{\sum_1^n \frac{1}{G_i} \cdot \ln\left(\frac{V_i}{V_{i-1}}\right)}, \dots V_i \neq V_{i-1}. \quad (4)$$

Следует отметить, что, если в  $i$ -ом слое скорость звука не меняется, пользоваться формулой (4) нельзя. В этом случае стоящее в знаменателе выражение для времени распространения сигнала в  $i$ -ом слое видоизменяется на  $\Delta z_i / V_i$ , а скорость зондирования в этом слое будет равна значению  $V_i$ .

Перейдем к оценке возможных источников погрешности расчёта  $C_{ZOND}$ .

*Оценка вклада базовых источников погрешности расчёта.* Суммарная погрешность расчёта  $C_{ZOND}$  зависит от:

- точности измерения вертикального распределения гидрофизических параметров ГФП (температуры, солёности, давления);
- точности косвенных методов расчёта скорости звука;
- точности методов расчёта скорости зондирования;
- погрешности, вызванной степенью вертикального разрешения исходных данных о ВРСЗ;
- погрешностей, используемых в качестве исходной информации данных климатического или прогностического характера.

Первые два источника ошибок назовём базовыми, имея ввиду, что их погрешности в целом определяются достигнутым уровнем развития средств и методов гидрофизических измерений и, видимо, достигли своего предела.

*Погрешности измерения ГФП.* Согласно, например, документу [10] современные зондирующие комплексы типа "Seabird" имеют максимальную погрешность измерения температуры 0,005 °С, а солёности – на уровне 0,002 практической шкалы солёности (ПШС). Такой уровень погрешности приводит к погрешности расчёта скорости звука за счёт неточности измерения температуры 0,015 м/с и за счёт солёности – 0,002 м/с. То есть общая погрешность расчёта скорости звука за счёт неточности измерения современными средствами не превышает 2 см/с. Обычно считается, что данные гидрофизических измерений, сопутствующие эхолотированию, полностью отражают гидрофизические условия во время проведения промерных работ. Это не так, но в настоящей работе вопрос репрезентативности данных измерений не рассматриваются.

*Погрешности косвенных методов расчёта скорости звука.* Общее число методов косвенного расчёта скорости звука исчисляется десятками. К числу наиболее распространённых и достаточно легко реализуемых относят методы расчёта Чена и Миллерио [11], Лероя [12], Дель Гроссо [13], Медвина [14], Кинслера, Фрая и Коппенса

[15]. Погрешности современных методов расчёта скорости звука по данным о температуре, солёности и давлении морской воды лежат в пределах 0,1–0,2 м/с.

Существуют и более точные методы расчёта скорости звука. Два таких метода, полученные путём аппроксимации нового стандартного международного уравнения состояния морской воды TEOS-10 предложены в работе [16]. Первое уравнение предназначено для использования в технических целях и имеет среднюю квадратическую погрешность (СКП) 0,987 см/с. Второе, более точное, уравнение предназначено для применения в научных целях и его СКП оценивается в 0,113 см/с.

При обосновании требований к точности методов расчёта  $C_{ZOND}$  нужно иметь в виду уровень погрешности базовых источников погрешности. Как видим, при использовании наиболее распространённых методов косвенного расчёта скорости звука погрешность методов расчёта скорости зондирования не должна превышать 20–22 см/с. В ближней перспективе (при использовании нового уравнения состояния TEOS-10) погрешность методов расчёта скорости зондирования должна быть снижена до уровня 1 см/с.

### Оценка точности методов расчёта скорости зондирования при разной степени вертикального разрешения

Оценка выполнена на примере ВРСЗ в юго-восточной части Балтийского моря. Используются исходные данные из массива GDEM ВМС США (Generalized Digital Environmental Model v. 3) [17].

ВРСЗ, для которого выполнена оценка точности, приведено на рис. 2. Кривая "А" – это исходные данные из массива GDEM с высоким вертикальным разрешением, а кривая "Б" – это те же данные, представленные на «стандартных горизонтах».

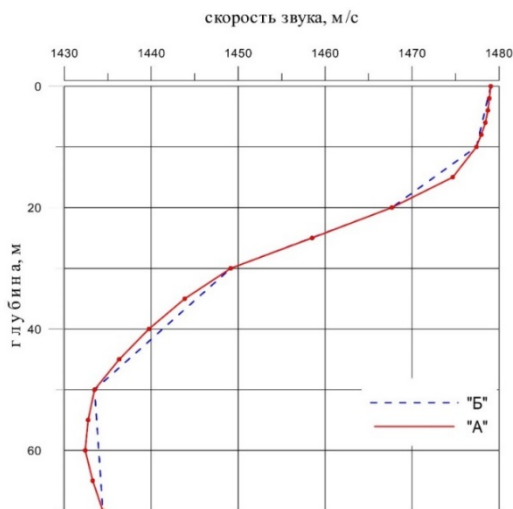


Рис. 2. Вертикальное распределение скорости звука на горизонтах массива GDEM ("А") и на стандартных горизонтах ("Б")

Отметим, что в соответствии с руководством [18] в СССР и в России стандартными называют горизонты, где признано обязательным выполнение глубоководных наблюдений с помощью батометров. Стандартными горизонтами считаются:

1) для океанов и глубоководных морей – 0, 10, 20, (25), 30, 50, 75, 100, (125), 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000 м и далее через 1000 м и на придонном горизонте;

2) для мелководных морей – 0, (5), 10, 15, 20, (25), 30, 40, 50, 60, (75), 80, 100, (125), 150, 200 м и на придонном горизонте.

В скобках обозначены необязательные горизонты.

Именно стандартные горизонты принято считать основными при обобщении и создании отечественных баз гидрофизических данных.

Появление современных средств зондирования с высокой дискретностью измерений, исчисляемой единицами метров, привело к появлению более подробных данных о вертикальной структуре гидрофизических полей. Это способствовало тому, что и степень вертикального разрешения измерений и обобщённых гидрофизических данных возросла.

В качестве примера в табл. 1 приведена характеристика вертикального разрешения упомянутой выше базы GDEM ВМС США и наиболее широко распространённой базы World ocean atlas (WOA) Национального центра окружающей среды (NCEI) NOAA США [4, 5].

**Таблица 1. Вертикальное разрешение ( $\Delta z$ ) баз GDEM-3 и WOA-23**

| WOA-23     |                | GDEM-3     |                |
|------------|----------------|------------|----------------|
| глубины, м | $\Delta z$ , м | глубины, м | $\Delta z$ , м |
| 0–100      | 5              | 0–10       | 2              |
| 100–500    | 25             | 10–100     | 5              |
| 500–2000   | 50             | 100–200    | 10             |
| 2000–5500  | 100            | 200–300    | 20             |
|            |                | 300–400    | 50             |
|            |                | 500–1600   | 100            |
|            |                | 1600–6600  | 200            |

Результаты расчёта скорости зондирования по приведённым выше формулам (1), (2), (4) и невязки с точным значением (4) для ВРСЗ высокого "А" и низкого "Б" разрешения (рис. 1) приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты расчёта  $C_{ZOND}$  по формулам (1, 2, 4) и невязок между ними**

| Исходные данные   | Результаты и невязки расчёта $C_{ZOND}$ |                           |                             |
|---|---|---------------------------|-----------------------------|
| ВРСЗ "А" (высокого разрешения – GDEM)                   | $\bar{C}$                               | $\bar{C}_h$               | $\bar{C}_a (A)$             |
|   | 1451,0428                               | 1450,8220                 | 1450,8208                   |
|   | $\bar{C} - \bar{C}_a$                   | $\bar{C} - \bar{C}_h (A)$ | $\bar{C}_h - \bar{C}_a$     |
|   | 0,2220                                  | 0,2208                    | 0,0012                      |
| ВРСЗ "Б" низкого разрешения – на стандартных горизонтах | $\bar{C}$                               | $\bar{C}_h$               | $\bar{C}_a$                 |
|   | 1451,3871                               | 1451,1887                 | 1451,1810                   |
|   | $\bar{C} - \bar{C}_a (A)$               | $\bar{C} - \bar{C}_h$     | $\bar{C}_h - \bar{C}_a (A)$ |
|   | 0,5663                                  | 0,1984                    | 0,3679                      |

Приведённые в табл. 2 результаты показывают, что для типовых гидрологических условий в мелководных районах погрешность за счёт отождествления средней скорости зондирования со средневзвешенной скоростью звука (1) при высокой степени вертикального разрешения составляет 0,2 – 0,3 м/с. Это несколько выше погрешности современных методов косвенного расчёта скорости звука по температуре и солёности воды. А вот невязка между точным значением  $C_{ZOND}$  (4) и средней гармонической скоростью (2) не превысила 0,01 м/с.

За счёт снижения степени вертикального разрешения до «стандартного» уровня, невязки с «точным»  $\bar{C}_a$  (А) значением скорости зондирования в рассматриваемом мелководном районе возросли до 0,4–0,6 м/с.

Таким образом, при использовании во время эхолотирования сопутствующих измерений ГФП в качестве исходных, помимо применения точной формулы (4), необходимо обеспечить высокую дискретность измерений на уровне 2–5 м особенно в мелководных районах океана.

### **Оценка погрешности расчёта скорости зондирования при использовании обобщённых данных о ВРСЗ**

На практике вместо детальных данных сопутствующих инструментальных гидрофизических измерений продолжают использовать данные климатической обработки результатов многолетних измерений – средние ВРСЗ различного масштаба пространственного и временного обобщения. При использовании таких данных основная погрешность вызвана естественной изменчивостью гидрофизических полей. Ещё одна специфическая погрешность может возникать в том случае, если средние значения скорости звука рассчитывают не по средним значениям всего массива расчётных значений скорости, а по данным средних значений температуры и солёности воды. Такого рода погрешности вызваны нелинейной зависимостью скорости звука от температуры и солёности. Оценка погрешностей такого рода выполнена в работе [19]. Выявлено, что для умеренных широт невязки между результатами расчёта средней годовой скорости звука такими методами в деятельном слое (0–300 м) составляют 0,3–0,6 м/с, глубже средняя невязка падает до 0,1 м/с. Максимальная невязка между среднемесячными значениями скорости звука при осреднении по одноградусным трапециям возрастает до 1,0 м/с в деятельном слое и до 0,5 м/с глубже 500 м.

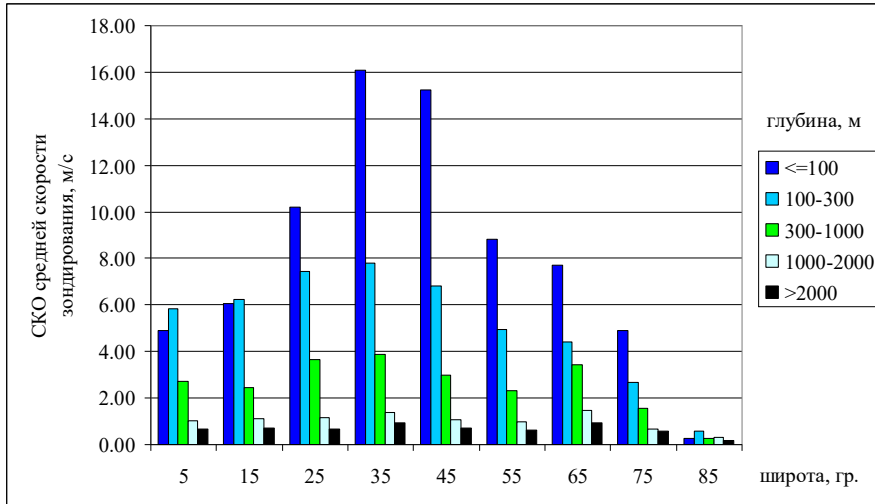
В доступных массивах ГФП в состав исходных данные о скорости звука обычно не входят. Также отсутствуют сведения о естественной изменчивости поля скорости звука. Поэтому для оценки среднего квадратического отклонения (СКО) средних значений скорости звука приходится использовать сведения о СКО температуры и солёности воды. Учитывая зависимость скорости звука от температуры и солёности воды, ниже СКО скорости звука ( $V$ ) оценена по формуле:

$$\sigma_V = 3 \cdot \sigma_T + \sigma_S.$$

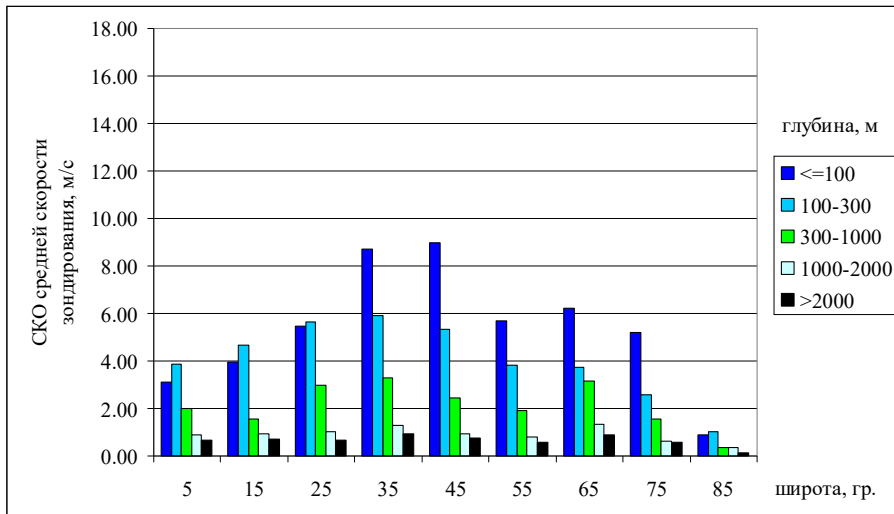
В виде примера по полученным данным оценены погрешности расчёта скорости зондирования при использовании климатических данных. В качестве исходных использованы данные атласа WOA-23 [4, 5] с масштабом пространственного

осреднения 1 угловой градус и двумя временными масштабами осреднения – 1 год и сезон для акватории Мирового океана в северном полушарии.

Результаты расчёта СКО средних значений  $C_{ZOND}$  в зависимости от широтной зоны и глубины места приведены на рис. 3, 4.



**Рис. 3. СКО среднегодовых значений скорости зондирования при одноградусном осреднении**



**Рис. 4. СКО среднесезонных (лето) значений скорости зондирования при одноградусном осреднении**

Как можно было ожидать, наибольшие погрешности среднегодовой скорости зондирования отмечаются в мелководных районах океана в полосе широт от 20 до 70° с. ш. Здесь погрешности достигают 8–16 м/с. Южнее, севернее, и глубже 300 м изменчивость гидрофизических полей существенно ниже. Так, в районах с глубиной

более 1000 м СКП  $C_{ZOND}$  за счёт отождествления скорости зондирования со среднегодовыми данными не превышает 1 м/с.

Снижение временного осреднения с года до сезона позволяет заметно снизить рассматриваемую СКП. Например, в мелководных районах глубиной менее 100 м в полосе широт от 20 до 70° с. ш. погрешности снижаются почти вдвое – с 8–16 м/с до 5–9 м/с. Южнее и севернее, а также глубже изменчивость гидрофизических полей также уменьшается. Но в районах с глубиной более 1000 м СКП среднегодовых и среднесезонных значений скорости зондирования практически не отличаются друг от друга и не превышают 1 м/с.

За счёт снижения периода осреднения до 1 месяца можно ожидать дальнейшего снижения погрешности использования данных климатического характера при расчёте  $C_{ZOND}$ .

### **Оценка погрешности расчёта скорости зондирования по прогностическим данным систем оперативной океанографии.**

Помимо инструментальных данных наблюдений и климатических сведений о ВРСЗ, нельзя исключить использование прогностической информации о ГФП, получаемой современными системами оперативной океанографии. Пока такие данные для Мирового океана в целом доступны только за рубежом. Примером является система Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) – Морская служба мониторинга океана Европейской системы оперативной океанологии Copernicus. В России подобная система находится в начальной стадии проектирования [20].

Действующая система глобального анализа и прогноза гидрофизических полей Мирового океана Коперникус имеет глобальный охват, горизонтальное разрешение – 1/12° и 50 уровней по вертикали, разрешение по времени – 1 сутки. Результаты её верификации опубликованы в документе [21]. Средние невязки с данными наблюдений и средние квадратические погрешности (СКП) прогноза температуры и солёности были рассчитаны в 2015 г. перед внедрением самой системы в эксплуатацию. Показатели СКП прогноза температуры (СКП  $T$ ) и солёности (СКП  $S$ ) были обобщены по 6 слоям: 0–5, 5–100, 100–300, 300–800, 800–2000, 2000–5000 м, по двухградусным трапециям для Мирового океана в целом, а также для девяти его отдельных регионов (Северная и тропическая Атлантика, Средиземное море, и др.). Максимальные СКП прогноза отмечаются в районах Гольфстрима и Куроисио, других сильных течений, где СКП  $T$  достигает 2 °С, а СКП  $S$  достигает 0,5 ПШС, что соответствует максимальной СКП прогноза скорости звука СКП  $V$  около 6,5 м/с. Полученные результаты оценки СКП для Мирового океана в целом приведены в табл. 3.

В этой же таблице приведены результаты расчёта СКП скорости звука (СКП  $V$ ) по слоям и СКП скорости зондирования  $C_{ZOND}$  в зависимости от глубины места ( $Z$ ).

Сравнивая полученные результаты со СКО использования среднесезонных данных с масштабом пространственного обобщения 1 градус, можно утверждать, что данные систем оперативной океанографии позволяют снизить погрешность  $C_{ZOND}$  в мелководных районах практически в три раза по сравнению с использованием климатических данных.

**Таблица 3. Оценка СКП прогноза средних суточных значений ГФП службой СМЕМС в целом по Мировому океану**

| Слой      | Глубина, Z | СКП T, °C | СКП S, ПШС | СКП V, м/с | СКП $C_{ZOND}$ (Z), м/с |
|-----------|------------|-----------|------------|------------|-------------------------|
| 0–5       | 5          | 0,65      | 0,2        | 2,15       | 2,15                    |
| 5–100     | 100        | 0,89      | 0,17       | 2,84       | 2,81                    |
| 100–300   | 300        | 0,78      | 0,11       | 2,45       | 2,62                    |
| 300–800   | 800        | 0,43      | 0,06       | 1,35       | 1,82                    |
| 800–2000  | 2000       | 0,17      | 0,03       | 0,54       | 1,05                    |
| 2000–5000 | 5000       | 0,22      | 0,02       | 0,68       | 0,83                    |

### Заключение

Дан обзор используемых методов расчёта скорости зондирования при эхолотировании. Обоснована необходимость отказа от упрощённого метода на основе расчёта средневзвешенной скорости звука (1), ошибка при использовании которого в мелководных районах составляет 0,2–0,3 м/с. При переходе на использование аналитического выражения (4) или выражения для средней гармонической скорости звука (2) ошибка методического характера исчезает.

Проанализирована роль разнообразных источников ошибок при расчёте  $C_{ZOND}$ .

Показано, что за счёт низкого разрешения исходных данных о ВРСЗ, при использовании, например, «стандартных горизонтов» ошибка расчёта  $C_{ZOND}$  в мелководных районах достигает 0,4–0,6 м/с. При использовании данных с вертикальной дискретностью 2–5 м ошибка за счёт этого фактора практически исчезает.

Оценены СКП расчёта  $C_{ZOND}$  при использовании вместо сопутствующих инструментальных измерений ГФП данных климатического характера и прогностической информации систем оперативной океанографии.

Даны оценки погрешности  $C_{ZOND}$  за счёт использования данных климатического характера. Показано, что эти погрешности существенно зависят от глубины места, широтной зоны, степени пространственного и временного разрешения климатических данных. Выполнен расчёт СКП  $C_{ZOND}$ , вызванных использованием климатических данных с осреднением 1 градус по пространству, 1 год и 1 сезон по времени. Показано, что в мелководных районах (глубина менее 100 м) северного полушария и при годовом масштабе осреднения погрешность достигает 16 м/с, а при снижении масштаба временного обобщения до сезона падает до 9 м/с. В глубоководных районах, где глубина превышает 1000 м погрешность в этих случаях не превышает 1 м/с. Это говорит о том, что при эхолотировании глубоководных районов океана допустимо использовать климатическую информацию о ГФП с горизонтальным разрешением 1° с годовым масштабом временного осреднения.

На примере СМЕМС Европейской системы оперативной океанографии Коперникус показано, что в настоящее время её продукция позволяет заметно снизить погрешность расчёта  $C_{ZOND}$  по отношению к использованию информации климатического характера. Так, в мелководных районах океана погрешность расчёта



$C_{ZOND}$  снижается по сравнению с использованием климатических данных почти в три раза – до 2,0–3,0 м/с.

В дальнейшем планируется оценить точность методов расчёта скорости зондирования по наклонной трассе, используемых при информационной поддержке применения гидролокаторов бокового обзора и акустических систем позиционирования.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ 8.5 ИО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таблицы для исправления глубин, измеренных эхолотом за отклонение действительной средней вертикальной скорости звука в воде от расчётной / Изд. Министерство обороны Союза ССР. Главное Управление навигации и океанографии. – 1983. – 235 с.
2. Мореходные таблицы (МТ-2000). – СПб.: Изд. ГУНиО МО, 2002. – 575 с.
3. Воротынцева А. С., Островский Д. Б. Об учете вертикального распределения скорости звука при измерении глубины водоема // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2023. – Т. 16. – № 9. – С. 30–37. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-30-37. URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-9-2023-30-37.pdf>.
4. Locarnini R. A., Mishonov A. V., Baranova O. K., Reagan J. R., Boyer T. P., Seidov D., Wang Z., Garcia H. E., Bouchard C., Cross S. L., Paver C. R., Dukhovskoy D. World Ocean Atlas 2023, Volume 1: Temperature. A. Mishonov Technical Ed. NOAA Atlas NESDIS 89, doi.org/10.25923/54bh-1613. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/>
5. Reagan J. R., Seidov D., Wang Z., Dukhovskoy D., Boyer T. P., Locarnini R. A., Baranova O. K., Mishonov A. V., Garcia H. E., Bouchard C., Cross S. L., Paver C. R. World Ocean Atlas 2023, Volume 2: Salinity. A. Mishonov, Technical Editor, NOAA Atlas NESDIS 90, doi.org/10.25923/70qt-9574. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/>
6. Matthews J. D. Tables of the Velocity of Sound in Pure Water and Sea Water for use in Echo-sounding and Echo-ranging. Second Edition. H.D. 282. – Hydrographic Department, Admiralty, London. – 1939. – 52 p. URL: <https://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/0bc1d7e2-98d1-4565-99b4-fbfad03b7079/>
7. Maul G. A., Bishop J. G. Mean sounding velocity. A brief review / International Hydrographic Review. – 1970. XLVH (2), July. – Pp. 85–92. URL: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/download/23912/27697/>.
8. Manual on Hydrography. Pub. C-13. 1st Edition 2005 (Correction to 2011) / Int. Hydrographic Organization. Monaco Ch.3. Depth determination. – P.119–196 URL: [https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/english/C\\_13\\_Chapter\\_3\\_December2010.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/english/C_13_Chapter_3_December2010.pdf).
9. Мастрюков С. И. Расчёт эффективной скорости звука в море // Записки по гидрографии. – № 214. – 1986. – С. 35–38.
10. РД 52.10.895–2020. Наставление гидрометстанциям и постам. Вып. 8 Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть 4. Рейдовые гидрометеорологические наблюдения. М.: ООО «Принт», 2020. – 156 с.
11. Chen-Tung Arthur Chen, Frank J. Millero. November 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. The Journal of the Acoustical Society of America 62(5):1129–1135. DOI:10.1121/1.381646.
12. Leroy, C. C., 1969: Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic. Calculation of the Speed of Sound in Seawater. J. Acoust. Soc. Am., 46 (1B), 216–226, [https://doi.org/10.1016/0041-624x\(69\)90929-9](https://doi.org/10.1016/0041-624x(69)90929-9).
13. Del Grosso V. A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) // J. Acoust. Soc. Am. 1974. Vol. 56. No. 4. P. 1084–1091. <https://doi.org/10.1121/1.1903388>.
14. Medwin, H., 1975: Speed of Sound In Water: A Simple Equation for Realistic Parameters. J. Acoust. Soc. Am., 58 (6), 1318–1319, <https://doi.org/10.1121/1.380790>.
15. Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V., "Fundamentals of Acoustics", Third Edition, Wiley, New York, 1982.
16. Греков А. Н., Греков Н. А., Сычев Е. Н., Кузьмин К. А. Метод расчёта скорости звука в морской воде для измерения быстроизменяющихся океанических процессов // Океанологические исследования. – 2022. – Том 50. – № 2. – С. 5–33. URL: <https://jor.ocean.ru/index.php/jor/article/download/787/582>.

17. Database description for the Generalized Digital Environmental Model –Version 3.0. / Naval Oceanographic Office, Oceanographic Data Bases Division, Stennis Space Center, MS. – 2009. URL: [https://www.hycom.org/attachments/063\\_metzger1-2009.pdf](https://www.hycom.org/attachments/063_metzger1-2009.pdf).
18. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Изд. третье. – М.: ГОИН., 2016. – 537 с. <http://гоин.рф/services/metody-i-metodiki/rukovodyashchie-dokumenty/rukovodstvo-po-gidrologicheskim-rabotam-v-okeanakh-i-moryakh>.
19. Мاستрюков С. И., Лямзина В. Г. О некоторых причинах ошибок при расчёте средних значений скорости звука и плотности морской воды // Навигация и гидрография. – 2015. – № 41. – С. 51–58.
20. Мастрюков С. И., Бахмутов В. Ю., Коваленко В. В., Телегин В. А., Легкий Н. М., Михайлов В. М., Вильфанд Р. М., Нестеров Е. С. Новые вызовы в области создания современных отечественных систем оперативной океанографии // Навигация и гидрография. – 2022. – № 68. – С. 58–67.
21. Lellouche J-M. et al. Quality information document. For Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHY\_001\_024. URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf> // Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), Ref: CMEMS-GLO-QUID-001-024. – 2019. – Issue 2.1. – 81 p.

***ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS***

*МАСТРЮКОВ Сергей Иванович*, ведущий научный сотрудник НИОЦ Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, e-mail: [mastr\\_si@mail.ru](mailto:mastr_si@mail.ru).

*Sergey I. MASTRYUKOV*, Leading Researcher of oceanographic center of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Doctor of Sciences, e-mail: [mastr\\_si@mail.ru](mailto:mastr_si@mail.ru).

УДК 355/359 (094)

**ТИПОВОЙ РАЗДЕЛ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
ТАЙНЫ В ТЕХНИЧЕСКОМ ЗАДАНИИ НА ВЫПОЛНЕНИЕ МОРСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Соколов Н. С.<sup>1</sup>, Тимонов А. С.<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>900 Военное представительство Министерства обороны РФ.

*Аннотация.* В статье раскрыты содержание и особенности обеспечения защиты государственной тайны в Техническом задании организации – заказчика на выполнение морских исследований.

*Ключевые слова:* морские исследования, защита государственной тайны.

*Для цитирования:* Соколов Н. С., Тимонов А. С. Типовой раздел по обеспечению защиты государственной тайны в Техническом задании на выполнение морских исследований // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 94–96.

**A TYPICAL SECTION ON ENSURING THE PROTECTION OF STATE SECRETS IN  
THE TERMS OF REFERENCE FOR MARITIME RESEARCH**

**Sokolov N. S.<sup>1</sup>, Timonov A. S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

<sup>2</sup>900 Military Representative, RF MoD.

*Abstract.* The article reveals the content and features of ensuring the protection of state secrets in the Terms of Reference prepared by the commissioning organization for maritime research.

*Keywords:* Maritime research, state secret protection.

*For citation:* Sokolov N. S., Timonov A. S. A Typical Section on Ensuring the Protection of State Secrets in the Terms of Reference for Maritime Research // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 94–96.

Взаимоотношения по вопросам в области защиты государственной тайны между Заказчиком и Исполнителем при выполнении совместных работ определены требованиями ст. 17 закона Российской Федерации от 21.07.1993 № 5485-1 «О государственной тайне» [1] и ст. 8 постановления Правительства Российской Федерации от 05.01.2004 № 3-1 «Инструкция по обеспечению режима секретности в Российской Федерации» [2]. Выполнение данных требований является обязательным и должно отражаться отдельным разделом в Техническом задании на выполнение морских исследований, как правило, последним по нумерации.

Ниже представлен образец типового раздела Технического задания под условным номером «7», содержание которого отвечает требованиям действующих нормативных правовых актов.

**7. Требования по обеспечению защиты государственной тайны при выполнении морских исследований**

7.1. Настоящий раздел регулирует отношения между Заказчиком и Исполнителем, возникающие в связи с наличием в отчетных материалах сведений

ограниченного распространения, необходимости их засекречивания или рассекречивания, а также защитой в интересах обеспечения безопасности Российской Федерации.

7.2. При наличии в планируемых к получению отчетных материалах сведений, составляющих государственную тайну, Исполнитель (организация, общество) может быть допущен для проведения морских исследований только при наличии допуска к проведению работ, связанных с использованием сведений, составляющих государственную тайну. Руководитель и конкретные исполнители должны иметь допуски к сведениям, составляющим государственную тайну.

7.3. После завершения исследований Исполнитель обязан предусмотреть выполнение требований следующих руководящих документов:

- закон Российской Федерации от 21.07.1993 № 5485-1 «О государственной тайне» [1];
- постановление Правительства Российской Федерации от 05.01.2004 № 3-1 «Инструкция по обеспечению режима секретности в Российской Федерации» [2].

7.4. Исполнитель обязан при получении разрешения на морские исследования определить установленным порядком наличие сведений, составляющих государственную тайну, в планируемых к получению отчетных материалах, в соответствии с требованиями статей 6, 9, 11 закона Российской Федерации «О государственной тайне» [1] и статьи 28 «Инструкции № 3-1» [2].

7.5. Основаниями полагать наличие сведений, составляющих государственную тайну, в планируемых для получения отчетных материалах являются

- результаты их рассмотрения комиссией экспертов Исполнителя с оформлением заключения на соответствие Перечню сведений, подлежащих засекречиванию, федерального органа исполнительной власти, который дает разрешение на выполнение морских исследований;
- условия по вопросам защиты государственной тайны полученного разрешения на выполнение данных морских исследований, которое согласуется всеми заинтересованными федеральными органами исполнительной власти.

7.6. При наличии в планируемых к получению отчетных материалах сведений, составляющих государственную тайну, Исполнитель обязан разработать и согласовать с Заказчиком «План мероприятий по обеспечению защиты государственной тайны при подготовке и выполнении морских исследований» в соответствии с требованиями статьи 8 «Инструкции № 3-1» [2].

7.7. После выполнения исследований Исполнитель обязан комиссией экспертов своей организации (общества) провести анализ полученных отчетных материалов на предмет наличия в них сведений, составляющих государственную тайну, и оформить соответствующее заключение. Для анализа используется перечень сведений, подлежащих засекречиванию, того федерального органа исполнительной власти, который дает разрешение на выполнение морских исследований.

Перечень и содержание полученных отчетных материалов, планируемых Исполнителем для засекречивания на основании выводов экспертного заключения, необходимо предварительно согласовать с Заказчиком.

7.8. Открытое опубликование отчётных материалов морских исследований и международный обмен полученными данными могут осуществляться в порядке,

установленном действующим законодательством, включающим проведение экспертизы Минобороны России.

7.9. При выполнении геодезических работ по топографической съемке Исполнитель обязан

- представить отчетные материалы Заказчику в местной системе координат;
- получить заключение регионального управления Росреестра на предмет наличия в отчетных материалах сведений, составляющих государственную тайну.

7.10. Вместе с отчетными материалами выполненными морских исследований Заказчику представляются:

- заключение комиссии экспертов Исполнителя о наличии сведений, составляющих государственную тайну, в указанных материалах;
- заключение регионального управления Росреестра на предмет наличия в отчетных материалах сведений, составляющих государственную тайну;
- заключение Минобороны России о возможности открытого опубликования отчетных материалов и использования их в международных отношениях (при необходимости открытого опубликования).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Закон Российской Федерации от 21.07.1993 № 5485-1 «О государственной тайне» (с изменениями и дополнениями).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.01.2004 № 3-1 «Инструкция по обеспечению режима секретности в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*СОКОЛОВ Николай Сергеевич*, ведущий научный сотрудник АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат технических наук, e-mail: sokolovns@mail.ru.

*Nikolay S. SOKOLOV*, Senior Researcher of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Candidate of Sciences, e-mail: sokolovns@mail.ru.

*ТИМОНОВ Анатолий Сергеевич*, начальник 900 Военного представительства Министерства обороны РФ, e-mail: Teammix@yandex.ru.

*Anatoliy S. TIMONOV*, Chief of the 900 Military Representative, RF MoD, e-mail: Teammix@yandex.ru.

УДК 551.466.7+004.421

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИЛИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА OTPS И ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИЛИВНОЙ МОДЕЛИ TPXO****Маттис А. В.<sup>1</sup>, Бахмутов В. Ю.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Федеральный научно-производственный центр акционерное общество «Научно-производственное объединение «Марс»», г. Ульяновск.<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

*Аннотация.* Представлена программа для ЭВМ «Расчет приливных явлений», позволяющая рассчитывать и формировать сеточные массивы уровня моря и составляющих скорости течения в виде файлов в формате NetCDF. В программе использован алгоритм расчета приливных явлений, реализованный в программном пакете OTPS для прогнозирования приливов на основе моделей TPXO.

*Ключевые слова:* моделирование, глобальные модели приливов, приливы, приливные течения, гармонические постоянные, TPXO9, алгоритмы, программа для ЭВМ.

*Для цитирования:* Маттис А. В., Бахмутов В. Ю. Прогнозирование приливных явлений на основе алгоритмов программного пакета OTPS и глобальной приливной модели TPXO // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 97–103.

**FORECASTING OF TIDAL PHENOMENA BASED ON ALGORITHMS OF THE OTPS SOFTWARE PACKAGE AND THE GLOBAL TIDAL MODEL TPXO****Mattis A. V.<sup>1</sup>, Bakhmutov V. Yu.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.<sup>2</sup>FRPC JSC RPA "Mars", Ulyanovsk.

*Abstract.* The computer program "Calculation of tidal phenomena" is presented, which allows calculating and forming grid arrays of sea level and components of the flow velocity in the form of files in the netCDF format. The program uses an algorithm for calculating tidal phenomena implemented in the OTPS software package for predicting tides based on TPXO models.

*Keywords:* modeling, global tidal models, tides, tidal currents, harmonic constants, TPXO9, algorithms, computer program.

*For citation:* Mattis A. V., Bakhmutov V. Yu. Forecasting of Tidal Phenomena Based on Algorithms of the OTPS Software Package and the Global Tidal Model TPXO // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 97–103.

В настоящее время для прогнозирования приливных явлений в различных районах Мирового океана широко используются глобальные приливные модели TPXO9/10, DTU10, HAMTIDE, FES2014, EOT20, GOT4/5 и другие, основанные на данных спутниковой альтиметрии (в основном, со спутников TOPEX/POSEIDON) и представляющие собой сеточные массивы гармонических составляющих прилива [1–6], а также соответствующее специализированное программное обеспечение для прогнозирования приливов.

Ряд научных работ посвящен исследованию точности глобальных моделей между собой [7–9]. Как правило, для проведения исследований используется единый

для сравниваемых моделей обобщенный алгоритм расчета уровня прилива, а сравнению подлежат амплитуды и фазы гармонических составляющих прилива для различных моделей, при этом особенности реализации программного обеспечения для прогнозирования приливных явлений, предоставляемого разработчиками глобальных приливных моделей, не учитываются.

В настоящей работе представлен алгоритм расчета приливных колебаний уровня моря и составляющих скорости течения, реализованный в программном пакете OTPS для прогнозирования приливов на основе моделей ТРХО. Выбор для исследований модели ТРХО обусловлен высоким пространственным разрешением данных модели (0,125 градуса), а также наличием в открытом доступе программного пакета OTPS на исходном языке Fortran, позволяющего [1]:

- извлекать гармонические константы из глобальных, атласных, региональных и локальных баротропных моделей приливов ТРХО в заданных районах;
- прогнозировать приливы в определённых точках в заданное время;
- извлекать локальные многокомпонентные модели из набора глобальных однокомпонентных моделей ТРХО в заданных районах.

Недостатком программного пакета OTPS является отсутствие возможности получения и визуализации сеточных массивов результатов прогноза в заданном районе в заданный интервал времени. Для устранения этого недостатка разработана программа для ЭВМ «Расчет приливных явлений», позволяющая рассчитывать и формировать сеточные массивы уровня и составляющих скорости течения в виде файлов в формате NetCDF, которые могут быть отображены в геоинформационной системе QGIS или другой.

#### **Алгоритм расчета приливных явлений, реализованный в программном пакете OTPS для прогнозирования приливов на основе моделей ТРХО**

Входными данными для расчета являются:

- заданная григорианская дата: год  $Y$ , месяц  $M$  (1–12), день  $D$  (1–31) и время: часы  $h$  (0–23), минуты:  $m$  (0–59), секунды:  $s$  (0–59);
- глубина моря в заданной точке Мирового океана  $z$ , м;
- гармонические постоянные приливных колебаний уровня в заданной точке Мирового океана: реальная часть  $H_i^{Re}$ , м; мнимая часть  $H_i^{Im}$ , м, где  $i=1..15$  – порядковый номер гармоники  $m2, s2, k1, o1, n2, p1, k2, q1, 2n2, mf, mm, m4, ms4, mn4, s1$  соответственно.

– гармонические постоянные приливных составляющих скорости течения в заданной точке Мирового океана ( $U$  – восточная составляющая,  $V$  – северная составляющая): реальная часть  $U_i^{Re}, V_i^{Re}$ , м2/с; мнимая часть  $U_i^{Im}, V_i^{Im}$ , м2/с.

Выходными данными расчета является:

- уровень прилива  $h$ , м;
- восточная составляющая скорости приливного течения  $u$ , м/с;
- северная составляющая скорости приливного течения  $v$ , м/с.

Расчет выполняется в следующем порядке.

1. По заданным григорианской дате и времени рассчитывается модифицированная юлианская дата  $Mjd$ .

В пакете OTPS для расчета модифицированной юлианской даты реализована отдельная подпрограмма, эквивалентная следующим известным выражениям:

$$JD = (1461 * (Y + 4800 + (M - 14)/12))/4 + (367 * (M - 2 - 12 * ((M - 14)/12)))/12 - (3 * ((Y + 4900 + (M - 14)/12)/100))/4 + D - 32075, \quad (1)$$

где  $JD$  – юлианская дата.

$$Mjd = JD - 2400001 + h/24 + m/(24 * 60) + s/(24 * 60 * 60). \quad (2)$$

Примечание: все деления в формуле (1) целочисленные.

2. Модифицированная юлианская дата приводится к эпохе 01.01.2000 12:00:00 по Гринвичу:

$$T = Mjd - 51544,4993. \quad (3)$$

3. Рассчитывается средняя долгота восходящего узла лунной орбиты  $n$ , рад:

$$n = (125,0445 - 0,05295377 * T) * pi/180. \quad (4)$$

4. Рассчитываются нодальные поправки к амплитуде  $f_i$  и фазе  $u_i$ , рад для приливных гармоник  $i = 1..15$  по табл. 1.

**Таблица 1. Формулы расчета нодальных поправок к амплитуде и фазе**

| Гармоника | Формулы расчета нодальных поправок к амплитуде $f_i$ и фазе $u_i$ , рад   |
|-----------|---|
| $m2$      | $f_1 = \sqrt{(1,0 - 0,03731 * \cos(n) + 0,00052 * \cos(2n))^2 + (0,03731 * \sin(n) - 0,00052 * \sin(2n))^2}$ $u_1 = \operatorname{atan} \frac{-0,03731 * \sin(n) + 0,00052 * \sin(2n)}{1,0 - 0,03731 * \cos(n) + 0,00052 * \cos(2n)}$ |
| $s2$      | $f_2 = 1,0, u_2 = 0,0$  |
| $k1$      | $f_3 = \sqrt{(1,0 + 0,1158 * \cos(n) - 0,0029 * \cos(2n))^2 + (0,1554 * \sin(n) - 0,0029 * \sin(2n))^2}$ $u_3 = \operatorname{atan} \frac{-0,1554 * \sin(n) + 0,0029 * \sin(2n)}{1,0 + 0,1158 * \cos(n) - 0,0029 * \cos(2n)}$         |
| $o1$      | $f_4 = \sqrt{(1,0 + 0,189 * \cos(n) - 0,0058 * \cos(2n))^2 + (0,189 * \sin(n) - 0,0058 * \sin(2n))^2}$  |



| Гармоника  | Формулы расчета нодальных поправок к амплитуде $f_i$ и фазе $u_i$ , рад  |
|------------|--|
|            | $u_4 = (10,8 * \sin(n) - 1,3 * \sin(2n) + 0,2 * \sin(3n)) * \frac{\pi i}{180,0}$   |
| <i>n2</i>  | $f_5 = f_1, u_5 = u_1$   |
| <i>p1</i>  | $f_6 = 1,0, u_6 = 0,0$   |
| <i>k2</i>  | $f_7 = \sqrt{(1,0 + 0,2852 * \cos(n) + 0,0324 * \cos(2n))^2 + (0,3108 * \sin(n) + 0,0324 * \sin(2n))^2}$<br>$u_7 = \text{atan} \frac{-0,3108 * \sin(n) - 0,0324 * \sin(2n)}{1,0 + 0,2852 * \cos(n) + 0,0324 * \cos(2n)}$ |
| <i>q1</i>  | $f_8 = \sqrt{(1,0 + 0,188 * \cos(n))^2 + (0,188 * \sin(n))^2}$<br>$u_8 = \text{atan} \frac{0,189 * \sin(n)}{1,0 + 0,189 * \cos(n)}$  |
| <i>2n2</i> | $f_9 = f_1, u_9 = u_1$   |
| <i>mf</i>  | $f_{10} = 1,043 + 0,414 * \cos(n)$<br>$u_{10} = (-23,7 * \sin(n) + 2,7 * \sin(2n) - 0,4 * \sin(3n)) * \frac{\pi i}{180,0}$   |
| <i>mm</i>  | $f_{11} = 1,0 - 0,130 * \cos(n), u_{11} = 0,0$   |
| <i>m4</i>  | $f_{12} = f_1^2, u_{12} = 2u_1$  |
| <i>ms4</i> | $f_{13} = f_{12}, u_{13} = u_1$  |
| <i>mn4</i> | $f_{14} = f_{12}, u_{14} = u_{12}$   |
| <i>s1</i>  | $f_{15} = 1,0, u_{15} = 0,0$   |

5. Определяются константы (угловая частота  $\omega_i$ , рад/с и фаза  $\phi_i$ , рад) для приливных гармоник 1–15 по табл. 2.

**Таблица 2. Константы приливных гармоник**

| <i>i</i> | Гармоника | Угловая частота $\omega_i$ , рад/с | Фаза $\phi_i$ , рад |
|----------|-----------|------------------------------------|---------------------|
| 1        | <i>m2</i> | 1,405189e-04                       | 1,731557546         |
| 2        | <i>s2</i> | 1,454441e-04                       | 0,000000000         |
| 3        | <i>k1</i> | 7,292117e-05                       | 0,173003674         |
| 4        | <i>o1</i> | 6,759774e-05                       | 1,558553872         |

| $i$ | Гармоника | Угловая частота $\omega_i$ , рад/с | Фаза $\phi_i$ , рад |
|-----|-----------|------------------------------------|---------------------|
| 5   | $n2$      | 1,378797e-04                       | 6,050721243         |
| 6   | $p1$      | 7,252295e-05                       | 6,110181633         |
| 7   | $k2$      | 1,458423e-04                       | 3,487600001         |
| 8   | $q1$      | 6,495854e-05                       | 5,877717569         |
| 9   | $2n2$     | 1,352405e-04                       | 4,086699633         |
| 10  | $mf$      | 0,053234e-04                       | 1,756042456         |
| 11  | $mm$      | 0,026392e-04                       | 1,964021610         |
| 12  | $m4$      | 2,810377e-04                       | 3,463115091         |
| 13  | $ms4$     | 2,859630e-04                       | 1,731557546         |
| 14  | $mn4$     | 2,783984e-04                       | 1,499093481         |
| 15  | $s1$      | 7,2722e-05                         | 0,0                 |

6. Модифицированное юлианское время  $Mjd$  приводится к моменту времени 1 января 1992, 00:00:00 по Гринвичу (для которого определены константы, представленные в табл. 2) и переводится в секунды:

$$t = (Mjd - 48622) * 24 * 60 * 60. \quad (5)$$

7. Для каждой приливной гармонике ( $i = 1..15$ ) рассчитываются безразмерные переменные составляющие приливообразующей силы:

а) реальная часть переменной составляющей приливообразующей силы:

$$A_i^{Re} = f_i \cos(\omega_i t + \phi_i + u_i), \quad (6)$$

б) мнимая часть переменной составляющей приливообразующей силы:

$$A_i^{Im} = f_i \sin(\omega_i t + \phi_i + u_i), \quad (7)$$

8. Рассчитывается уровень прилива, м:

$$h = \sum_{i=1}^{n=15} H_i^{Re} A_i^{Re} - H_i^{Im} A_i^{Im}. \quad (8)$$

9. Рассчитываются восточная и северная составляющие скорости приливного течения, м/с:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{n=15} U_i^{Re} A_i^{Re} - U_i^{Im} A_i^{Im}}{z}, \quad (9)$$

$$v = \frac{\sum_{i=1}^{n=15} V_i^{Re} A_i^{Re} - V_i^{Im} A_i^{Im}}{z}. \quad (10)$$

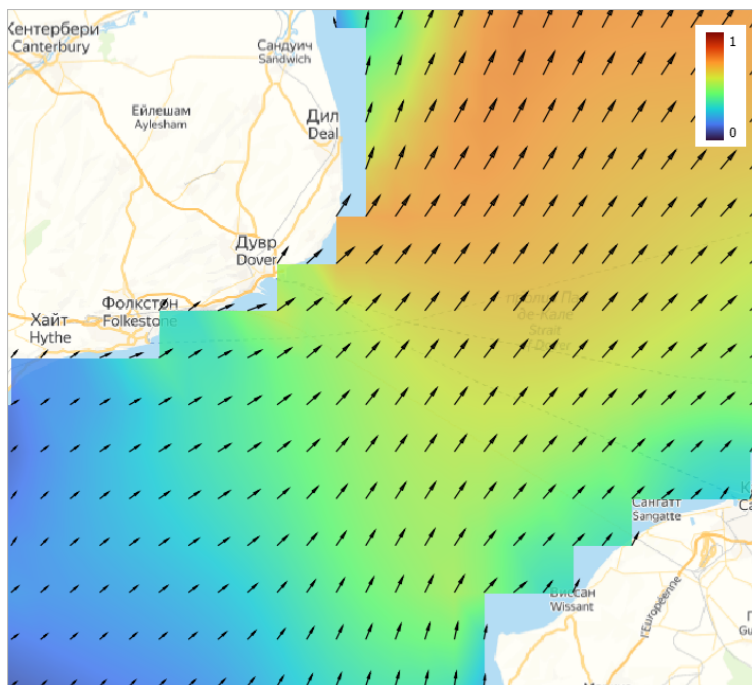
### Программа для ЭВМ «Расчет приливных явлений»

На основе приведенных выше алгоритмов разработана программа для ЭВМ «Расчет приливных явлений», предназначенная для расчета уровня прилива и составляющих вектора скорости приливного течения, и использующая для расчетов глобальную приливную модель ТХРО.

Программа выполняет следующие функции:

- расчет глубины моря по заданным координатам;
- расчет гармонических постоянных приливных колебаний уровня и составляющих скорости течения;
- расчет уровня прилива и составляющих вектора скорости приливного течения:
  - а) в заданной точке в заданное время;
  - б) в заданной точке в заданный интервал времени;
  - в) в заданном районе в заданное время;
  - г) в заданном районе в заданный интервал времени;

В отличие от пакета OTPS, разработанная программа позволяет формировать результаты расчета в виде сеточных массивов в формате NetCDF, доступных для отображения средствами геоинформационных систем типа QGIS (см. рисунок).



#### Отображение рассчитанного сеточного массива приливного течения средствами QGIS

Программа написана на языке C++ и представляет собой консольное приложение, функционирующее в среде операционной системы AstraLinux версии 1.7.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт «OSU TPXO Tide Models». URL: <https://www.tpxo.net/otps>.
2. Сайт национального космического института при Датском техническом университете. URL: [https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU10/DTU10\\_TIDEMODEL/](https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU10/DTU10_TIDEMODEL/)
3. Сайт Гамбургского университета «Ocean tides from HAMTIDE model». URL: <https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/hamtide.html>
4. Сайт «Global Tide - FES2014 description». URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>

5. Hart-Davis M. G., Piccioni G., Dettmering D., Schwatke C., Passaro M., Seitz F. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry, *Earth Syst. Sci. Data*, 13. – Pp. 3869–3884. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021>, 2021.
6. Сайт национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), США «Модели океанских приливов». URL: <https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/ocean-tide-models/>
7. Oreiro F. A., D’Onofrio E., Grismeyer W., Fiore M., Saraceno M. Comparison of tide model outputs for the northern region of the Antarctic Peninsula using satellite altimeters and tide gauge data // *Polar Science* – 2014. – №8. – 10–23 pp.
8. Seifi F., Deng X., Andersen O. B. Assessment of the Accuracy of Recent Empirical and Assimilated Tidal Models for the Great Barrier Reef, Australia, Using Satellite and Coastal Data // *Remote Sensing*. – 2019. – No 11. – Pp. 1211–1240 pp.
9. Романенков Д. А., Софьина Е. В., Родикова А. Е. Моделирование баротропного прилива у юго-восточного побережья п-ва Камчатка с учетом точности глобальных приливных моделей в северо-западном регионе Тихого океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2023. – № 16(4). С. 45–62.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*МАТТИС Алексей Валерьевич*, главный конструктор ФНПЦ АО «НПО «Марс», кандидат технических наук, e-mail: [mattisav@rambler.ru](mailto:mattisav@rambler.ru).

*Aleksey V. MATTIS*, Chief Designer of FRPC JSC «RPA «Mars», Candidate of Sciences, e-mail: [mattisav@rambler.ru](mailto:mattisav@rambler.ru).

*БАХМУТОВ Владимир Юрьевич*, начальник НИОЦ АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат военных наук, e-mail: [roc@gningi.ru](mailto:roc@gningi.ru).

*Vladimir Y. BAKHMUTOV*, Chief of Research oceanographic center of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Candidate of Sciences, e-mail: [roc@gningi.ru](mailto:roc@gningi.ru).

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.501.74

## **РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНОВ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППИРОВОК ВОЙСК (СИЛ)**

**Борисов А. А., Козлов Н. Г., Маков А. Б.**

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

*Аннотация.* В работе приводится обоснование необходимости разработки показателя опасности физико-географического района в гидрометеорологическом отношении. Предложен подход к синтезу показателя гидрометеорологической опасности района с использованием информации о повторяемости опасных и стихийных гидрометеорологических явлений, а также боевых потенциалов военно-технических систем.

*Ключевые слова:* неблагоприятные и стихийные гидрометеорологические явления, показатель гидрометеорологической опасности района, боевой потенциал.

*Для цитирования:* Борисов А. А., Козлов Н. Г., Маков А. Б. Разработка показателя гидрометеорологической опасности физико-географических районов в интересах обеспечения группировок войск (сил) // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 104–110.

## **DEVELOPMENT OF AN INDICATOR OF HYDROMETEOROLOGICAL HAZARD OF PHYSICO-GEOGRAPHICAL AREAS IN THE INTERESTS OF ENSURING TROOPS (FORCE) GROUPS**

**Borisov A. A., Kozlov N. G., Makov A. B.**

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

*Abstract.* The paper provides a justification for the need to develop a hazard indicator for a physico-geographical area in hydrometeorological terms. An approach is proposed to synthesize the indicator of the hydrometeorological danger of the area using information on the recurrence of dangerous and natural hydrometeorological phenomena, as well as the combat potentials of military-technical systems.

*Keywords:* adverse and spontaneous hydrometeorological phenomena, an indicator of the hydrometeorological danger of the area, combat potential.

*For citation:* Borisov A. A., Kozlov N. G., Makov A. B.. Development of an Indicator of Hydrometeorological Hazard of Physico-Geographical Areas in the Interests of Ensuring Troops (Force) Groups // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 104–110.

### **Введение**

В настоящее время влияние геосфер Земли на эффективность функционирования военно-технических систем (ВТС), а также необходимость его оценивания не вызывают сомнения [1]. С практической точки зрения, наибольший интерес представляют оценки влияния на эффективность функционирования ВТС

неблагоприятных гидрометеорологических условий как результат воздействия на систему метеорологических и гидрологических условий, которые затрудняют, а в ряде случаев исключают возможность применения ВТС. Такие гидрометеорологические условия (ГМУ) определяются как неблагоприятные и стихийные гидрометеорологические явления (НСГМЯ). Анализ возникновения и эволюции НСГМЯ показал, что их повторяемость и интенсивность в значительной степени зависят от физико-географических особенностей районов, над которыми они фиксируются. Поскольку эти НСГМЯ представляют опасность для применения некоторых ВТС, можно говорить о гидрометеорологической опасности этих физико-географических районов (ФГР) для выделенных образцов ВТС с точки зрения невозможности (ограниченной возможности) их применения. Зная оценки данной опасности, ее возможно учесть при подготовке и проведении операции группировками войск (сил) в данных районах. Таким образом, гидрометеорологическая опасность в отношении различных ВТС представляет собой одно из свойств ФГР, в котором планируется применение ВТС. Поэтому весьма актуальным является разработка показателя, характеризующего степень опасности ФГР с последующим его включением в соответствующие военно-географические описания.

#### **Разработка показателя гидрометеорологической опасности физико-географического района**

Рассмотрим современные методы оценивания опасности НСГМЯ для различных отраслей деятельности человека. Анализ работ, посвященных разработкам в области прикладной гидрометеорологии и климатологии [2, 3], показал, что термин «гидрометеорологическая опасность» настоящее время при исследованиях не используется. Вместо него при расчете природных опасностей и путей адаптации к ним населения используется понятие «гидрометеорологическая безопасность», рассматриваемое различными авторами как состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от воздействия опасных природных явлений, изменений климата.

Разбор данных работ показал следующее: во-первых, оценивание гидрометеорологической безопасности согласно данному выше определению должно включать оценивание мероприятий (в том числе и не метеорологического характера) по достижению субъектом защищенности; во-вторых, гидрометеорологическая безопасность является результатом совокупности мероприятий, проводимых человеком, и не может отражать одно из свойств ФГР; в-третьих, в рассмотренных работах вместо показателя гидрометеорологической безопасности используется показатель погодно-климатического риска, представляющий собой произведение вероятности наступления НСГМЯ на вероятность уязвимости субъекта, который может быть подверженным этой опасности. Здесь под уязвимостью понимают возможность нанесения ВТС, описываемой характеристикой  $Q$ , повреждений или ущерба вследствие появления негативных факторов, обусловленных проявлением НСГМЯ [4, 5]. Таким образом, показатель погодно-климатического риска характеризует опасность для субъекта, вызванную наличием НСГМЯ в ФГР. Поэтому в настоящей работе принято решение о введении понятия «гидрометеорологическая опасность» и разработке соответствующего показателя, которые будут соответственно описывать и оценивать опасность ФГР, на которой планируется применение ВТС.

Под гидрометеорологической опасностью, с точки зрения авторов настоящей статьи, следует понимать состояние природной среды в пределах некоторого ФГР, обусловленное атмосферными и физико-географическими факторами, представляющее угрозу для жизни, здоровья личного состава, выполнения боевых задач, а также сохранности и работоспособности ВТС и объектов инфраструктуры.

Для разработки показателя гидрометеорологической опасности воспользуемся положениями концепции погодно-климатических рисков. Из работы [5] известно, что для оценки величины риска необходимо иметь информацию о гидрометеорологических и климатических характеристиках и их изменениях в рассматриваемом ФГР, а также данные о подверженности находящихся на ней объектов неблагоприятному воздействию окружающей среды и их уязвимости к этому воздействию. Принимая во внимание определение погодно-климатического риска, показатель гидрометеорологической опасности ФГР ( $dng$ ) будет иметь смысл потерь, которые могут быть понесены при использовании ВТС в условиях НСГМЯ. Для оценивания влияния НСГМЯ на ВТС необходимо сравнить полученный результат с начальным значением характеристики ВТС  $Q$ . Тогда выражение для оценивания показателя  $dng$  примет следующий вид:

$$dng = \frac{P \cdot vrb}{Q} = \frac{P \cdot prb \cdot ssv(Q)}{Q}, \quad (1)$$

где  $P$  – повторяемость НСГМЯ в пределах рассматриваемого ФГР;  $vrb$  – уязвимость ВТС, находящейся в ФГР;  $prb$  – вероятность нанесения системе повреждений или ущерба вследствие появления негативных факторов, обусловленных проявлением НСГМЯ;  $ssv$  – чувствительность ВТС к воздействиям со стороны НСГМЯ;  $Q$  – характеристика ВТС.

Рассмотрим подробнее входящие в соотношение (1) величины и определим источники их получения. Показатель  $P$  можно определить, используя архивные данные гидрометеорологических наблюдений на станциях наземной наблюдательной сети, а также формулы сложения и произведения вероятностей.

Показатель  $prb$  зависит от интенсивности НСГМЯ и расположения ВТС относительно этого явления. Показатель  $prb$  принимает следующие значения:

$$prb = \begin{cases} 0, & \text{если ВТС не подвержена влиянию НСГМЯ} \\ 1, & \text{если ВТС подвержена влиянию НСГМЯ} \\ (0;1), & \text{если влиянию НСГМЯ подвержены некоторые элементы ВТС} \end{cases}.$$

Последнее равенство приведенного соотношения верно для сложной ВТС, состоящей из многих пространственно-разнесенных элементов, часть которых может попасть под действие НСГМЯ.

В качестве характеристики ВТС –  $Q$  в настоящей работе предлагается использовать боевой потенциал (БП) ВТС, поскольку он представляет собой интегральную характеристику ее предельных боевых возможностей, выраженную через основные функциональные свойства и тактико-технические характеристики

образца [6–9]. Для проведения оперативно-тактических расчетов величина БП ВТС может быть рассчитана по методике, приведенной в работе [7].

Показатель  $ssv$  определяется разработчиком ВТС на основе моделирования и опытной эксплуатации образцов данной техники в различных гидрометеорологических условиях. По полученным данным разрабатываются соответствующие функции, общий вид которых имеет следующий вид:

$$ssv = f(V, Q), \quad (2)$$

где  $Q$  – некоторая характеристика ВТС, обуславливающая выполнение задачи;  $V$  – характеристика НСГМЯ, влияющая на выполнение задачи ВТС;  $f$  – некоторая функция.

Далее определим вид функции  $ssv$ . Наиболее простым является следующее представление функции чувствительности ВТС к НСГМЯ:

$$ssv = f(V, Q) = a(V) \cdot Q = \begin{cases} Q, & \text{если } V > V_{kp_2}, & a = 1 \\ a \cdot Q, & \text{если } V \in [V_{kp_1}; V_{kp_2}], & a \in (0; 1), \\ 0, & \text{если } V < V_{kp_1}, & a = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $V_{kp_j}, j=1(1)2$  –  $j$ -е критическое значение характеристики НСГМЯ;  $a(V) \in [0; 1]$  – эмпирический коэффициент, указывающий на агрессивность НСГМЯ по отношению к ВТС. При  $a = 1$  чувствительность максимальна и равна  $ssv = Q$ . В этом случае при равенстве  $P = 1$  и  $prb = 1$  показатель гидрометеорологической опасности ФГР максимален для данной ВТС ( $dng = 1$ ). При  $a = 0$  чувствительность минимальна и равна  $ssv = 0$ . Тогда при  $P = 1$  и  $prb = 1$  показатель гидрометеорологической опасности ФГР минимален для данной ВТС ( $dng = 0$ ).

Однако для оценивания показателя  $ssv$  по выражению (3) необходимо знать вид зависимости  $a(V)$  на интервале  $(0; 1)$ . Определение вида этой зависимости представляет собой сложную задачу, требующую совместного решения с изготовителем ВТС. На практике при расчетах используется упрощенное представление выражения (3):

$$ssv = f(V, Q) = a(V) \cdot Q = \begin{cases} Q, & \text{если } V > V_{kp_2}, & a = 1 \\ 0, & \text{если } V < V_{kp_1}, & a = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Выражение (4) означает, что появление НСГМЯ (если  $V > V_{kp_2}, a = 1$ ) и нахождение ВТС в зоне влияния НСГМЯ ( $prb = 1$ ) полностью исключает возможность использования ВТС из-за получения максимального риска.

Тогда с учетом выражений (3) и (4) выражение (1) примет следующий вид:



$$dng = \frac{P \cdot prb \cdot a(V) \cdot Q}{Q} = P \cdot prb \cdot a(V). \quad (5)$$

Таким образом, из выражения (5) следует, что показатель  $dng$  при выполнении (4) не зависит от величины боевого потенциала ВТС.

В рамках рассматриваемой задачи по определению величины показателя гидрометеорологической опасности полезным свойством БП является его аддитивность. Так, БП воинского формирования может быть оценен с помощью следующей формулы:

$$Q_{\text{ВФ}} = \sum_k n_k Q_k, \quad (6)$$

где  $n_k$  – количество образцов  $k$ -й ВТС;  $Q_k$  – боевой потенциал  $k$ -го типа ВТС.

Тогда для воинского формирования, включающего в себя несколько типов ВТС, показатель  $dng_{\text{ВФ}}$  примет следующий вид:

$$dng_{\text{ВФ}} = \frac{\sum n_k \cdot P_k \cdot prb_k \cdot f_k(V, Q_k)}{Q_{\text{ВФ}}}. \quad (7)$$

При выполнении выражения (4) выражение (7) может быть представлено в виде (8):

$$dng_{\text{ВФ}} = \frac{\sum n_k \cdot P_k \cdot prb_k \cdot a(V) \cdot Q_k}{Q_{\text{ВФ}}}. \quad (8)$$

На основе выражений (5), (7) и (8) можно оценить, соответственно, гидрометеорологическую опасность для конкретной ВТС, для воинского формирования, включающего в себя образцы ВТС разных видов. Для удобства при практическом использовании полученные значения показателя  $dng$  могут быть представлены в графическом виде – карт гидрометеорологической опасности изучаемого ФГР как для единичной ВТС, так и для воинского формирования.

### Результаты оценивания гидрометеорологической опасности физико-географического района

Оценим гидрометеорологическую опасность ФГР для условной ВТС с показателем  $Q = 16$  и для воинского формирования, включающего в себя условные ВТС с показателями  $Q_1 = 16$ ,  $Q_2 = 24$  и  $Q_3 = 30$ . Рассчитаем для каждой ВТС показатель гидрометеорологической опасности ФГР и данный показатель для воинского формирования, включающего в себя все три ВТС. В качестве изучаемого в настоящей работе рассмотрен район г. Архангельска. Источником метеорологической информации являются результаты станционных измерений за период 1990–2000 гг. для декабря и июня, полученные с сайт ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета [10].

- Для проведения расчетов по формулам (5) и (7) необходимо:
- определить для каждой ВТС влияющие на ее функционирование НСГМЯ;
  - оценить повторяемость  $P_i, i = 1(1)3$  для каждой ВТС, выбранных НСГМЯ;
  - определить положение ВТС относительно источника НСГМЯ и оценить показатель  $prb$ ;
  - определить вид функции  $ssv$ .

Пусть для ВТС с  $Q_1$  НСГМЯ является скорость ветра, превышающая 12 м/с, для ВТС с  $Q_2$  НСГМЯ – высота нижней границы облаков менее 200 м, а для ВТС с  $Q_3$  НСГМЯ – горизонтальная дальность видимости менее 1000 м. Значения повторяемости НСГМЯ для ВТС представлены в табл. 1.

Таблица 1. Повторяемость НСГМЯ для ВТС

| Месяц   | Повторяемость |             |             |
|---------|---------------|-------------|-------------|
|         | ВТС с $Q_1$   | ВТС с $Q_2$ | ВТС с $Q_3$ |
| Июнь    | 0,42          | 0,34        | 0,07        |
| Декабрь | 0,61          | 0,55        | 0,18        |

Предположим, что все ВТС находятся в зоне действия НСГМЯ. В таком случае показатель  $prb = 1$ , а коэффициент  $a(V)$ , указывающий на агрессивность НСГМЯ, изменяется в соответствии с выражением (4). В этом случае

$$dng = P,$$

т. е. показатель гидрометеорологической опасности равен повторяемости НСГМЯ.

Оценки показателя  $dng_{\text{вф}}$  для воинского формирования, состоящего из двух ВТС с  $Q_1$ , трех ВТС с  $Q_2$  и четырех ВТС с  $Q_3$  для июня и декабря, соответственно, равны 0,66 и 0,36. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о большем влиянии погодных-климатических условий на воинское формирование предложенного состава зимой. Изменяя состав воинского формирования, а также более детально учитывая изменения коэффициента  $a(V)$ , можно добиться уменьшения расчетных значений  $dng_{\text{вф}}$ , т. е. снизить потери, которые могут быть понесены при использовании ВТС в рассматриваемом физико-географическом районе в интересующий сезон года.

### Заключение

Разработка представленного в настоящей работе показателя гидрометеорологической опасности направлена на повышение качества планирования применения ВТС в различных ФГР. Использование данного показателя позволит, прежде всего, повысить наглядность оценок степени зависимости конкретной ВТС или воинского формирования от погодных-климатических условий ФГР, на анализе которых органом управления формируется решение о целесообразности применения ВТС в данном районе в различное время года. Использование боевого потенциала как характеристики ВТС даст возможность оценить величину его снижения в конкретных

погодно-климатических условиях и спланировать, а также провести мероприятия по обоснованию состава воинского формирования, адаптированного для действий в конкретном ФГР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Маков А. Б., Федер А. Л., Шукин Г. Г. Методологический подход к оцениванию влияния гидрометеорологических условий на боевые возможности военно-технических систем // *Навигация и гидрография*. – 2023. – № 70. – С. 64–69.
2. Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Хандожко Л. А., Шаймарданов М. З. Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России // *Право и безопасность*. – 2007. – № 1-2(22-23). – С. 6–11.
3. Коршунов А. А., Шаймарданов М. З. О концепции гидрометеорологической безопасности экономики России: цели, основные задачи и показатели // *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. – 2002. – № 169. – С. 3–12.
4. Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфугова Ю. А. Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. – 2008. – № 558. – С. 162–171.
5. Кобышева Н. В., Акентьева К. М., Пигольцина Г. Б., Клюева М. В., Разова Е. Н., Шанина И. Н., Фасолько Д. В. Методическое руководство по оценке и управлению погодно-климатическими рисками и разработке адаптационных мер с экономическим обоснованием их применения в хозяйственной и социальной сферах // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. – 2020. – № 598. – С. 5–136.
6. Брезгин В. С., Буравлев А. И. О методологии оценки боевых потенциалов вооружения и военной техники и воинских формирований // *Военная мысль*. – 2010. – № 8. – С. 41–48.
7. Брезгин В. С., Цырендоржиев С. Р., Буравлев А. И. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов образцов ВВТ и воинских формирований // *Вооружение и экономика*. – 2009. – № 3. – С. 4–12.
8. Останков В. И., Казарин П. С. Методика сравнительной оценки боевых потенциалов войсковых формирований и качественного соотношения сил сторон в операциях // *Военная мысль*. – 2012. – № 11. – С. 47–58.
9. Борисов А. А., Девяткин А. М., Кулешов Ю. В., Маков А. Б. Методологический подход к оцениванию боевых возможностей межвидовых группировок войск (сил) с учетом гидрометеорологической обстановки и возможностей системы гидрометеорологического обеспечения // *Навигация и гидрография*. – 2017. – № 50. – С. 76–82.
10. Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. URL: <http://www.meteo.ru> (вход свободный, дата обращения 14.08.2024).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

*БОРИСОВ Алексей Анатольевич*, преподаватель кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, доцент, e-mail: [alebor\\_72@mail.ru](mailto:alebor_72@mail.ru).  
*Aleksey A. BORISOV*, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, teacher of the department, Candidate of Sciences, reader, e-mail: [alebor\\_72@mail.ru](mailto:alebor_72@mail.ru).

*КОЗЛОВ Николай Геннадьевич*, адъюнкт Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).  
*Nikolay G. KOZLOV*, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, adjunct, e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).

*МАКОВ Александр Борисович*, профессор кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор технических наук, доцент, e-mail: [vokat1@rambler.ru](mailto:vokat1@rambler.ru).  
*Aleksandr B. MAKOV*, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Professor of the Department, Doctor of Sciences, Associate Professor, e-mail: [vokat1@rambler.ru](mailto:vokat1@rambler.ru).

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ АТМОСФЕРЫ В АРКТИКЕ****Гамбургер Ю. В., Дмитрук В. В., Моисеева Н. О.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова», г. Санкт-Петербург.

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы возможности эксплуатации бортовой системы регистрации параметров профиля атмосферы в арктической зоне России для получения массива научной информации об атмосферных процессах Арктики, в том числе о распределении полей данных температуры, давления и влажности внутри полярных мезоциклонов.

*Ключевые слова:* циклон, метеорологическое обеспечение полетов, арктическая зона России.

*Для цитирования:* Гамбургер Ю. В., Дмитрук В. В., Моисеева Н. О. Анализ возможности применения бортовой системы регистрации параметров профиля атмосферы в Арктике // Навигация и гидрография. – 2024. – № 4 (77). – С. 111–118.

**ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING AN AIRBOURNE VERTICAL ATMOSPHERIC PROFILING SYSTEM IN ARCTIC****Gamburger I. V., Dmitruk V. V., Moiseeva N. O.**

Federal state-funded educational institution of higher education «Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov», St. Petersburg.

*Abstract.* The issues of the possibility of using an onboard vertical atmospheric profiling system for recording atmospheric profile parameters in the Arctic zone of Russia are considered to obtain an array of scientific information on atmospheric processes in the Arctic, including the distribution of temperature, pressure and humidity data fields within polar mesocyclones.

*Keywords:* polar low, meteorological service, arctic zone of Russia.

*For citation:* Gamburger I. V, Dmitruk V. V. Moiseeva N. O. Analysis of the Possibility of Using an Airbourne Vertical Atmospheric Profiling System in Arctic // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 4 (77). – P. 111–118.

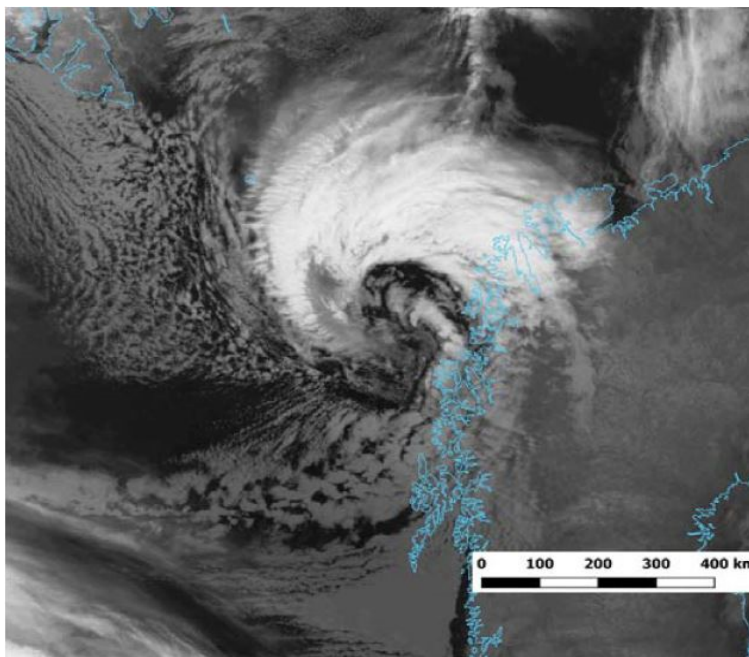
**Введение**

Арктическая зона РФ (АЗРФ) является критически важной территорией, имеющей приоритетное значение для нашей страны. Данное утверждение закреплено в различных нормативно-правовых документах и планах развития – от локального масштаба до самого высокого уровня. 7 июня 2024 г. Президент России, выступая в рамках Петербургского международного экономического форума («ПМЭФ 2024») страны, подтвердил, что более 15 % национального ВВП приносят предприятия, расположенные в Арктике [1].

На фоне продолжающегося экстенсивного экономического роста и параллельного развития наземной инфраструктуры стоит отметить, что хозяйственная деятельность человека в Арктике сопряжена с трудностями, связанными, прежде



На рис. 2 приведено изображение в инфракрасном диапазоне полярного циклона в Норвежском море.



**Рис. 2.** Изображение в инфракрасном диапазоне полярного циклона в Норвежском море

При описании характеристики погодных условий внутри ПМЦ стоит упомянуть несколько ключевых и наиболее опасных для авиации факторов [4]:

*1. Значительное, резкое ухудшение видимости*

Известны случаи, когда при ясной и холодной погоде происходило быстрое натекание плотной облачности по ходу движения ПМЦ.

*2. Обильные осадки*

В зимнее время наблюдается интенсивные снегопады, что, в частности, и приводит к экстремальному ухудшению видимости. Осадки облачной системы простираются в среднем в диапазоне высот до 3,5 км и на 200–400 км по горизонтали, занимая значительные морские и прибрежные площади.

*3. Штормовые скорости ветра*

В результате анализа характеристик погоды по данным 203 случаев образования ПМЦ зарегистрированы значения до 35 м/с.

*4. Обледенение*

По результатам практических визуальных и инструментальных наблюдений с научно-исследовательских судов (НИС) обледенение под воздействием явления ПМЦ незначительное у водной поверхности. Однако, это не исключает вероятное умеренное и сильное обледенение в более высоких широтах, где температура воды ниже, и в диапазоне высот действия ПМЦ, что критически опасно для аэронавигации в пределах активности явления.

Ключевой и наиболее опасный фактор заключается в сложности отслеживания ПМЦ на ранних стадиях формирования существующими техническими средствами

наблюдения и зондирования [5]. Ограниченность инструментов исследования зачастую обусловлена следующими факторами.

1. Коротким сроком существования/жизни метеорологического явления по сравнению с крупномасштабными циклонами. Средняя продолжительность существования ПМЦ составляет 13–15 часов.

2. Сложность обнаружения. Облачные мезовихри сравнительно небольшого диаметра (до 100 км) не отображаются в поле давления. В ряде ситуаций это характерно и для интенсивных ПМЦ. Данная ситуация типична для районов с недостаточным покрытием сети станций метеорологического слежения. В АЗРФ плотность станций в 10 раз меньше (рис. 3), чем в центральных районах РФ.

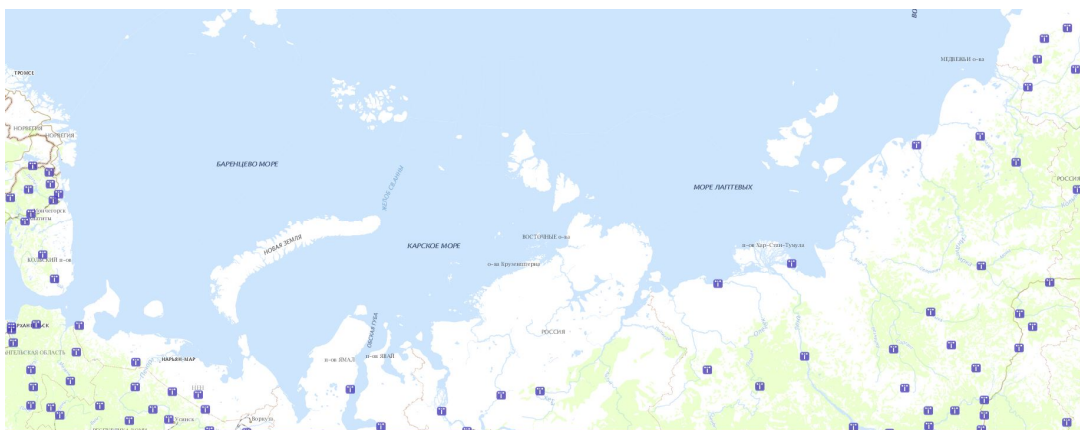


Рис. 3. Действующие метеорологические станции АЗРФ по данным ЕСИМО [6]

Совершенствование метеорологического обеспечения полетов должно идти по нескольким направлениям, одним из которых является разработка и внедрение современных и перспективных технических средств проведения исследований и регистрации параметров метеорологических величин. В контексте метеорологического обеспечения полетов в АЗРФ данная инициатива приобретает еще более важное значение [7–8].

С целью регистрации параметров полярных мезоциклонов авторами данной статьи предлагается внедрение и последующее использование комплексной системы зондирования атмосферы с помощью сбрасываемых невозвратных радиозондов (dropsondes) [9]. В качестве средств доставки сбрасываемого радиозонда (СРЗ) предлагается использование пилотируемых отечественных ВС на базе таких типов ВС как Ан-24, Ан-26, которые активно использовались в качестве воздушного разведчика погоды ВРП, в том числе в Арктике [10]. Также в перспективе могут быть рассмотрены для использования беспилотные авиационные системы доставки и легкие ВС (до 5700 кг)

Принцип измерения метеорологической величин является контактным. Измерения последних при радиозондировании относятся к классу метеорологических. Специфика используемого метода позволяет производить измерения не в одной точке, как, например, при наземных метеорологических измерениях, а во время движения измерительного прибора по вертикали.





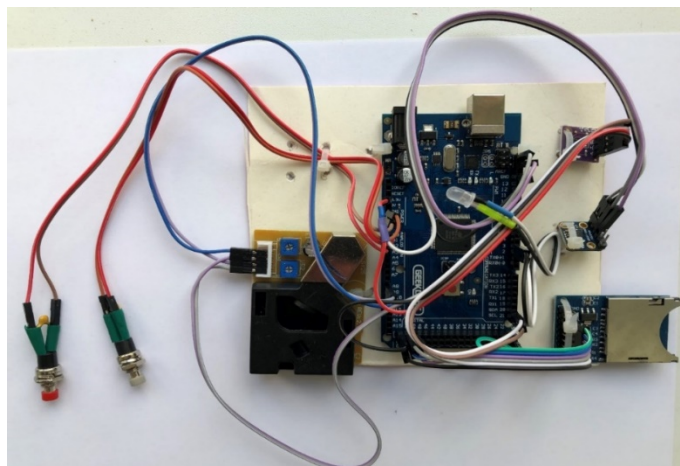


Рис. 5. Общий вид сбрасываемого радиозонда в разобранном виде

Ввиду отсутствия возможности проведения реальных испытаний было принято временное решение о использовании SD формата (флеш-память) для накопления регистрируемой информации. Включение/выключение записи было также упрощено и технически выполнено в формате нажимных кнопок.

Для программирования устройства была выбрана Arduino IDE – кросс-платформенное приложение для написания и загрузки программ на Arduino-совместимые платы (рис. 6). Выбор платы и среды программирования был обусловлен относительной простотой системы и удобным интерфейсом для разработки простых устройств.

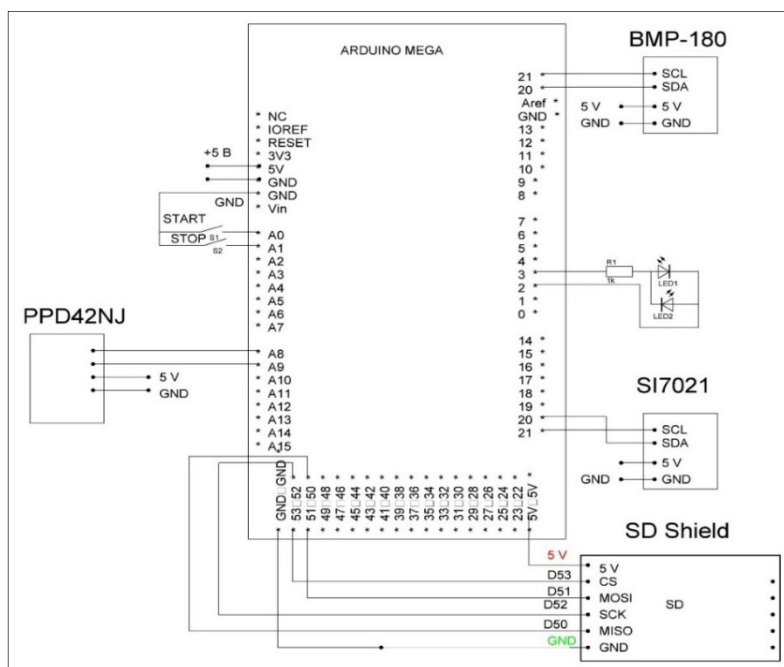


Рис. 6. Структурная схема устройства метеорологического зонда

Запись параметров давления, температуры, влажности и загрязнения воздуха осуществляется непрерывно в CSV формате. По результатам полученных данных указанного формата могут быть оперативно сформированы соответствующие диаграммы в программе Excel.

В результате апробации устройства были получены массивы данных температуры, давления и влажности, которые могут быть адаптированы для использования в различных целях, в том числе и для численного прогнозирования погоды (ЧПП).

### **Заключение**

Использование данной технологии позволит исследовать поля метеорологических параметров ПМЦ по вертикали. Появится реальная возможность изучить и обработать данные для полярных циклонов с коротким сроком жизни. Информация, которая может быть получена данным методом позволит уточнить и повысить качество локальных (местных) прогнозов погоды. Наибольший приоритет целесообразно отводить тем районам, где расположены прибрежные посадочные площадки и крупные северные аэродромы. Информация, полученная в результате проведения исследований, сможет быть адаптирована в моделях ЧПП. В процессе разработки собственной системы бортового зондирования с помощью СРЗ может быть использован значительный накопленный опыт эксплуатации подобных систем зарубежных коллег.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Интернет-представительство Президента России: офиц. Сайт. – URL: <http://www.kremlin.ru/> (дата обращения 20.06.2024).
2. Rasmussen E. A. A case study of a polar low development over the Barents Sea // *Tellus A.* – 1985. – Vol. 37. – No. 5. Pp. 407–418.
3. Межрегиональная общественная организация пилотов и граждан-владельцев воздушных судов: офиц. Сайт. – URL: <https://аора.ru> (дата обращения: 20.06.2024).
4. Опасные погодные явления в Арктике / И. А. Репина, А. А. Шестакова, М. И. Варенцов [и др.] // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий : материалы V Международной научно-практической конференции, Майкоп, 20–24 мая 2019 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет». Том 2. – Майкоп: Индивидуальный предприниматель Кучеренко Вячеслав Олегович, 2019. – С. 118–127. – EDN UINQJI.*
5. Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г., Дурнева Е. А. О критериях идентификации полярных мезоциклонов // *Метеорология и гидрология.* – 2022. – № 4. – С. 20–33. – DOI 10.52002/0130-2906-2022-4-20-33. – EDN THZEOO.
6. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане ЕСИМО. Офиц. сайт. – URL: <http://esimo.ru/portal> (дата обращения 20.06.2024).
7. Моисеева Н. О. Гамбургер Ю. В. Разработка перспективного образца метеорологического зонда для повышения безопасности полетов ВС // *Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2020 года. – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020. – С. 198–199. – EDN ZEFFAS.*

8. Синькевич А. А. Создание комплекса самолетной метеорологической аппаратуры, разработка методики ее применения и результаты экспериментальных исследований облаков. Автореферат диссертации д.т.н. С.-Петербург: ГГО, 1992, 27 с.
9. Национальный центр атмосферных исследований США: офиц. сайт. – URL: [https://www.eol.ucar.edu/observing\\_facilities/avaps-dropsonde-system](https://www.eol.ucar.edu/observing_facilities/avaps-dropsonde-system) (дата обращения 15.06.2024).
10. Глушков В. В., Куприков Н. М. Полярная авиация: состояние и перспективы развития // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 110–120. – EDN GQMWNC.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

*ГАМБУРГЕР Юрий Владимирович*, Аспирант кафедры авиационной метеорологии и экологии Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.ru).

*Yuriy V. GAMBURGER*, Postgraduate student of the Department of Aviation Meteorology and Ecology of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.ru).

*МОИСЕЕВА Наталья Олеговна*, Кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной метеорологии и экологии Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.ru).

*Natalya O. MOISEEVA*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aviation Meteorology and Ecology of the St. Petersburg State University of Civil Aviation, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.ru).

*ДМИТРУК Виктор Владимирович*, Аспирант кафедры авиационной метеорологии и экологии Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.ru).

*Viktor V. DMITRUK*, Postgraduate student of the Department of Aviation Meteorology and Ecology of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation, e-mail: [gamburger01@bk.ru](mailto:gamburger01@bk.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 морской 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 «ГНИНГИ» [www.gningi.ru](http://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 наименования 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 *MS Office* 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

№ 4 (77)

Декабрь 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](http://www.gningi.ru)

Цена свободная

Подписано в печать 23.12.2024 г. Формат 84×108/16

Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,81. Тираж 100 экз. Заказ № 9/3/2024-4з

Отпечатано 26.12.2024 г. в типографии ООО «Цифрофсет»,

199178, г. Санкт-Петербург, 5-я линия В.О., дом 70, литер А, помещение 52/52Н

АО “ГНИНГИ”  
2024

ISSN 2220-0983 “Навигация и гидрография” № 4 (77) Декабрь 2024