

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИОНОСФЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ЗАГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

С. В. Литвинов

*В статье затрагивается вопрос актуальности загоризонтной радиолокации и необходимости обеспечения информацией о текущих параметрах ионосферы. Рассматривается построение такой системы ионосферного обеспечения. Приводится процесс и результаты разработки программы для ЭВМ для моделирования такой системы. Программа реализована с помощью библиотеки Gnar.NET на языке программирования C# в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio.*

**Ключевые слова:** ионосфера, загоризонтная радиолокация, ионосферное обеспечение, программное обеспечение, моделирование, C#, Microsoft Visual Studio.

Функционирование радиолокационных станций (РЛС) загоризонтного обнаружения (ЗГО) является одним из самых востребованных использований эффекта отражения радиоволн коротковолнового диапазона от ионосферы. Основным назначением таких РЛС является обнаружение воздушных целей в конструктивной зоне обзора. Вместе с тем для корректной работы таких РЛС необходим грамотный выбор рабочей частоты, основанный на занятости частотного диапазона и текущем состоянии ионосферы. Несмотря на многолетние исследования этого вопроса, в настоящее время нет единого подхода к решению проблемы адаптации к геофизическим условиям (ГФУ) [1]. Разработчики загоризонтных радиолокаторов прилагают значительные усилия для разработки системы, позволяющей получить данные о загруженности частотного диапазона и оптимальным образом согласовать параметры РЛС с параметрами среды распространения.

Разработка такой системы служит достижению двух различных целей. Во-первых, необходимо получение в реальном времени данных для обеспечения рекомендаций по выбору рабочей частоты радиолокатора. При этом следует уделить внимание автоматизации этого процесса, который не потребует постоянного вмешательства и специальных навыков оператора. Во-вторых, система должна регулярно собирать и обрабатывать весь спектр ионосферных данных с целью накопления базы данных о среде распространения, необходимой для коррекции глобальной и региональной моделей ионосферы.

Система подстройки параметров РЛС загоризонтного обнаружения (ЗГО) под ГФУ предназначена для диагностики и краткосрочного прогнозирования ГФУ и радиофизических условий на трассах радиозондирования, формирования данных, используемых для оптимального (наилучшего) вы-

бора основных технических параметров трактов излучения зондирующих сигналов, приема и обработки радиолокационных сигналов.

Периодичность обновления результатов работы системы 15 минут в спокойных ГФУ и 5 минут в нестационарных условиях и в переходное время суток. Среднеквадратическое отклонение (СКО) прогнозируемой азимутальной девиации не превышает 2,0 градуса, а СКО коэффициента пересчета групповой дальности по лучу к дальности по Земле не превышает 18 км [2]. Предлагаемая система подстройки под геофизические условия (СПГУ) состоит из ряда различных измерительных подсистем и аппаратно-программных комплексов, объединенных с вычислительной системой РЛС ЗГО (рис. 1). Измерительная система состоит из: приемника панорамного обзора, системы возвратно-наклонного зондирования, системы ионосферного обеспечения (ионозонды вертикального (ВЗ) и наклонного зондирования (НЗ)).

В целях соблюдения электромагнитной совместимости во многих радиосистемах применяется система поиска рабочих каналов. Задача такой системы проверить необходимый диапазон частот на наличие сигналов других источников, которым излучение РЛС может создать помеху или которые сами могут служить помехой для станции. В зависимости от текущей необходимости это может быть проверка во всем доступном диапазоне рабочих частот или на небольшом диапазоне, выбранном для работы в конкретный момент времени [2].

Для максимального покрытия вертикальные ионозонды в большом количестве размещаются в зоне отражения от ионосферы, а наклонные ионозонды в конструктивной зоне обзора. Однако размещение неограниченного количества вертикальных ионозондов в зоне отражения невозможно и по экономическим и по техническим соображениям, а наклонные ионозонды в таком случае попадают на территорию других стран, что также делает невозможным их размещение [3].

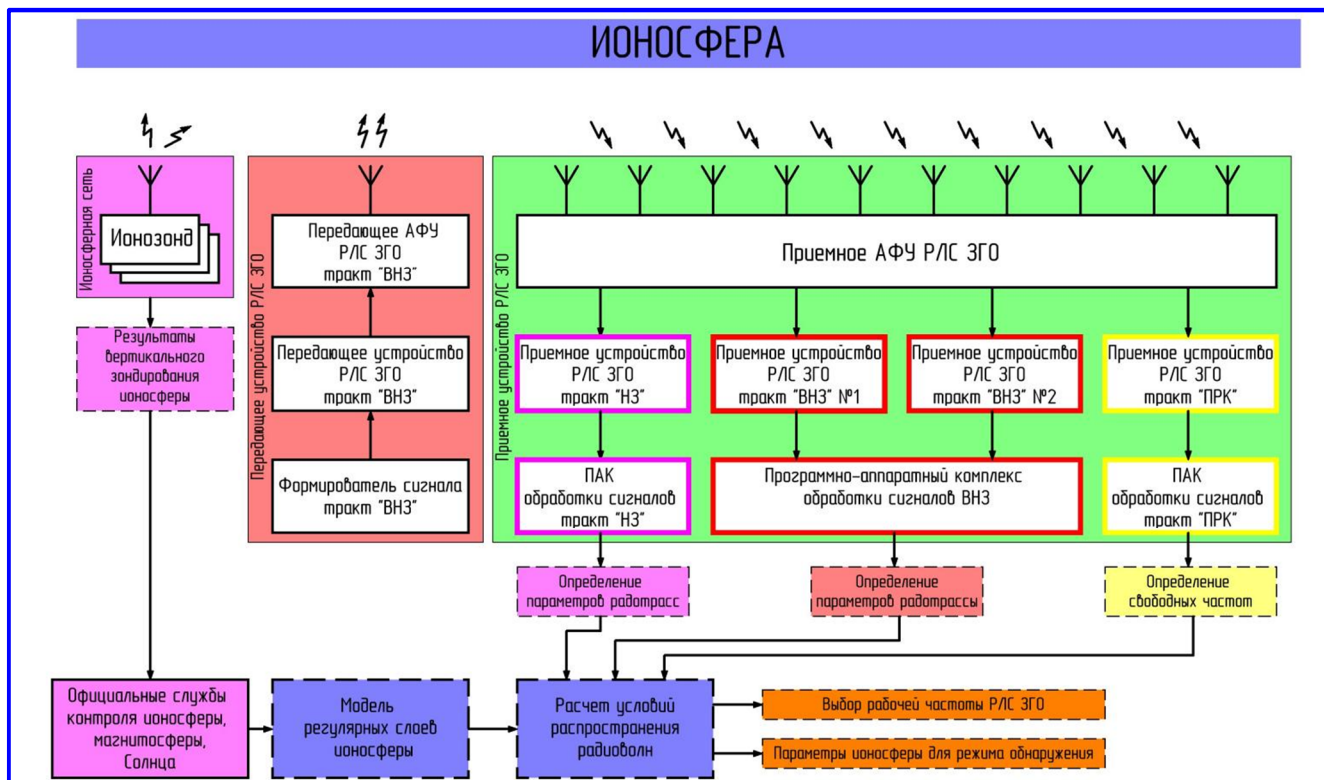


Рис. 1. Система подстройки к геофизическим условиям

### Разработка программного обеспечения для моделирования системы подстройки под геофизические условия

Из вышеизложенного следует, что для увеличения точности определения координат целей в загоризонтной радиолокации целесообразно применять вынесенные позиции, оснащенные ионозондами с возможностью ВЗ и НЗ ионосферы. Это позволит уменьшить статистическую ошибку определения координат, которая может достигать 100 км. [5]. Объединенные в общую сеть они представляют собой СПГУ. По мнению автора в минимально-достаточной СПГУ в интересах РЛС ЗГО с зоной обзора по азимуту  $60^\circ$  минимально достаточно четырех вертикально-наклонных ионозондов. Четыре вертикальных ионозонда, размещенные по углам зоны отражения, способны минимально-достаточно обеспечить корректировку региональной модели ионосферы. Однако в реальных условиях не всегда есть возможность разместить вынесенные позиции там, где требуется. Среди ограничений могут быть труднодоступные места, закрытые/запрещенные районы, территория сопредельных государств.

Таким образом, необходимо решить задачу определения конкретных мест размещения вынесенных позиций. При этом предполагается размещение большего числа вынесенных позиций. Для решения этой задачи разработано программное обеспечение

OTHR System (Программа моделирования системы ионосферного обеспечения РЛС ЗГО).

Разработка программного обеспечения проводилась в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio Community 2019 v16.11.8, бесплатно распространяемой для индивидуального использования. Также важным аргументом при выборе стало то, что данный продукт позволяет разрабатывать как консольные приложения, так и приложения с графическим интерфейсом, в том числе с поддержкой технологии Windows Forms, что и было использовано при разработке. Немаловажным является и поддержка множества языков программирования, в том числе Visual Basic.NET, а до его появления – Visual Basic, Visual C++, Visual C#, Visual F#, JavaScript, Python, TypeScript, XAML. Для создания приложения был выбран язык C#. Этот язык более предпочтителен, так как он является объектно-ориентированным, позволяет строить гибкую архитектуру приложения и качественный графический интерфейс.

При моделировании системы применительно к реальным и потенциальным РЛС существует необходимость указания местоположения радиолокатора и вынесенных позиций в виде конкретных географических координат, а также отображение зон обзора радиолокатора и ионозондов. Визуализировать их нахождение на карте по заданным координатам или обеспечить интерактивный ввод путем непосред-

ственного размещения координат на карте с помощью технологии drag-and-drop («перетаскивания»). Рассматривалось решение этой задачи с использованием непосредственно API (An Application Programming Interface) картографической системы и JavaScript и с привлечением готовых библиотек для платформы .NET. После проведенного анализа выбор был сделан в пользу готовой библиотеки GMap.NET, так как необходимые функции являются стандартными и реализованы в используемой библиотеке, которая помимо прочего в своем составе имеет поддержку нескольких картографических ресурсов, при этом смена поставщика картографической подложки не отражается на функциональности.

GMap.NET Windows Forms & Presentation – удобный, бесплатный и кроссплатформенный элемент управления .NET с открытым исходным кодом. Позволяет использовать маршрутизацию, геокодирование и карты из Google, Bing, OpenStreetMap, Yandex, WikiMapia и многое другое [6].

Структура программы состоит из нескольких логических блоков:

- сектор запуска (инициализация переменных, начальные настройки, запуск таймера, выбор карты/спутника);

- сектор РЛС ЗГО (функция размещения РЛС ЗГО, функция отображения зон ответственности и зон отражения, отображение известных РЛС Франции и Австралии);

- сектор ионозондов (функция размещения ионозонда, функция отображения зоны ответственности и трасс наклонного зондирования, отображение известных ионозондов северного полушария, включая ионосферные станции Росгидромета (ФГБУ «ИПП»);

- сектор формы (кнопки выход, сброса, открытие файлов справки и лицензии, кнопки отображения окна «О программе», снимка экрана и формирования отчета).

Одна из ключевых задач программы – размещение на карте положения РЛС ЗГО по заданным координатам и условное отображение зоны обзора. В функцию построения радиолокатора передаются координаты РЛС, азимут центрального направления обзора и полный сектор обзора. Обрато возвращается собственно слой на карте, содержащий маркер с заданными координатами, также эта информация вносится в таблицу, на основании которой впоследствии формируется отчет. За стандарт в данном случае принят сектор обзора РЛС ЗГО, равный  $60^\circ$  по азимуту. Известны РЛС ЗГО с секторами обзора  $90^\circ$  (Австралия) и даже  $360^\circ$  (Франция) [7, 8].

В функцию построения сектора обзора радиолокатора передаются координаты РЛС, азимут центрального направления обзора и полный сектор обзора. Обрато также возвращается слой на карте, содержащий условный сектор на карте, в рамках которого радар способен отслеживать воздушную обстановку. В данном случае за стандарт принят и сектор обзора РЛС ЗГО, равный  $60^\circ$  по азимуту, и дальность действия, равная одному отражению от ионосферы – от 1000 до 3000 км. Часто на практике считают эти дальности с запасом – от 900 до 2800 км.

### **Программа моделирования системы ионосферного обеспечения радиолокационной станции загоризонтного обнаружения**

Изображение интерфейса программы приведено на рис. 2. Программа предназначена для моделирования систем радиолокационного ЗГО, в том числе с вынесенными активными позициями.

Программа позволяет:

- разместить на карте мира РЛС с заданными координатами и направлением излучения с одновременным отображением зоны ответственности;

- отобразить условно эффективные зоны отражения радиоволн при работе в зоне ответственности;

- разместить на карте мира станции ионосферного зондирования (ионозонды) с заданными координатами;

- отобразить условные зоны ответственности ионозондов;

- построить потенциальные трассы НЗ ранее добавленных ионозондов с условной зоной отражения радиосигналов;

- вывести отчет полученного моделирования.

Начинается работа с программой с запуска файла OTHR System.exe. При запуске программы появится окно (рис. 2). Работа с картографическими данными предусматривает использование компьютера со стабильным доступом в сеть Интернет в режиме онлайн. Важной особенностью программы является возможность отображения как в виде схемы, так и в виде спутниковых снимков (путем выбора соответствующего пункта меню или активации пиктограммы в левом нижнем углу карты).

Рассмотрим работу приложения на примере системы ЗГО Австралии [7], параметры которой заложены в программе (рис. 3). При выборе соответствующего пункта меню на карте отобразятся три станции в Jindalee системы JORN: Queensland, Western Australian, Alice Springs. Также информация о параметрах этих станций отображается в таблице справа. Тот же эффект можно достичь очередным вводом координат, азимута и сектора обзора соответствующих позиций.

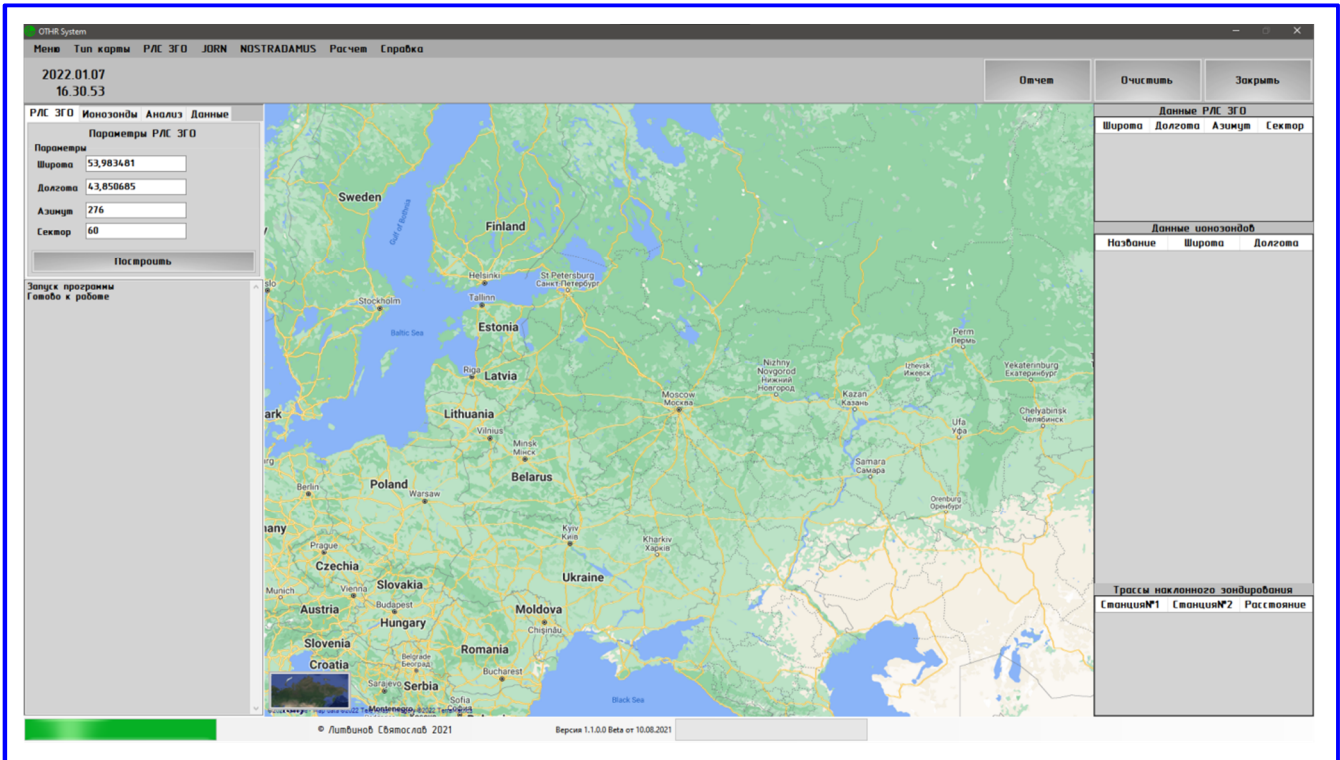


Рис. 2. Стартовое окно программы

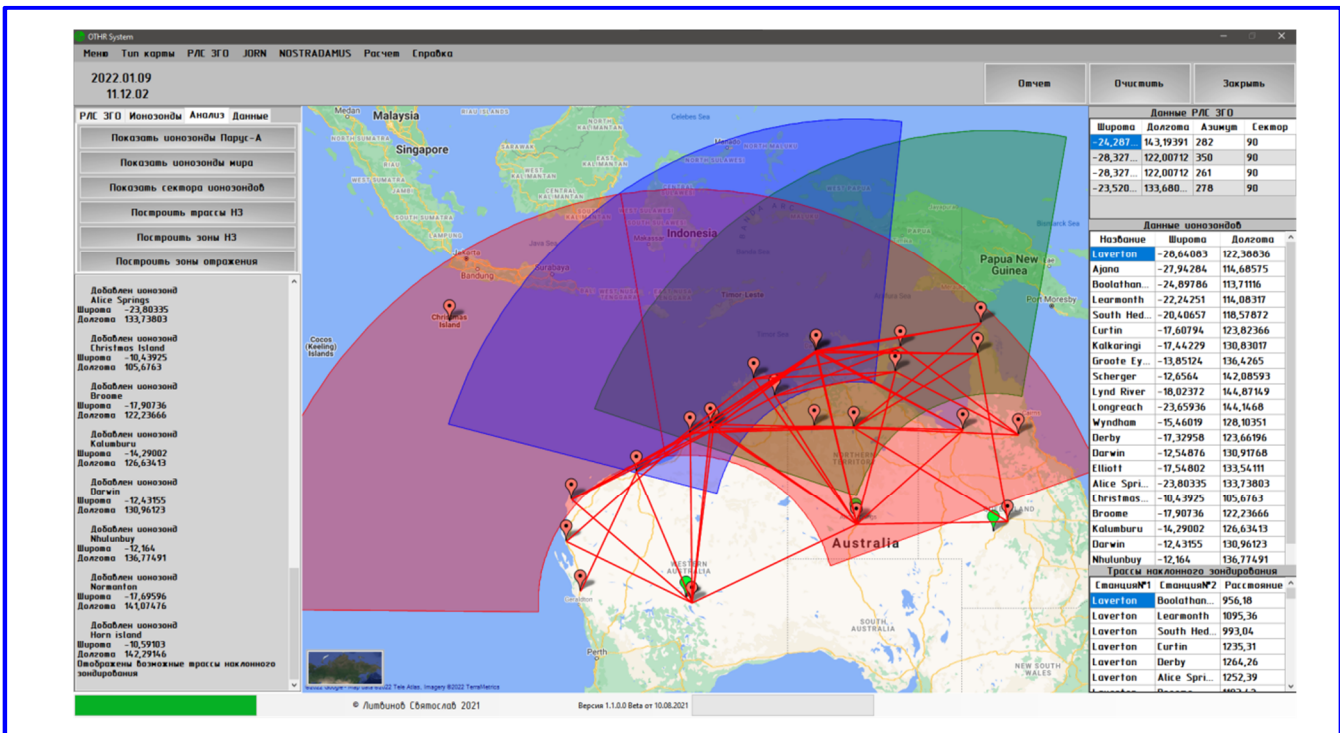


Рис. 3. Результат моделирования системы

Стоит заметить, что станция Western Australian состоит из двух ортогональных друг другу узлов, поэтому в программе они выделены как две отдельные станции, отличающиеся главным азимутом зондирования. Также, в отличие от большин-

ства загоризонтных РЛС мира, радиолокаторы Jindalee обладают сектором обзора 90°, что отражено в таблице (рис. 3).

Следующим шагом является отображение ионозондов системы JORN нажатием соответствующей

кнопки. Параметры этих ионосферных станций (координаты и наименования) заложены в программе, также эти станции возможно внести очередным вводом их параметров в соответствующем окне. После отображения ионозондов информация о них появляется в соответствующей таблице справа (см. рис. 3).

Затем есть несколько возможных путей анализа ситуации. Программа способна отобразить все возможные трассы НЗ как между ионозондами, так и между ионозондами и радиолокаторами. При этом принимается, что дальность эффективного НЗ составляет от 800 до 2000 км. Здесь же программа может отобразить и зоны ответственности ионозондов, то есть области в которых параметры ионосферы считаются неизменными, такая область принимается равной 450 км в диаметре [9]. Также возможно отобразить примерные области отражения сигнала при НЗ. На рис. 3 показан результат моделирования системы ионосферного обеспечения РЛС ЗГО на примере системы JORN Австралии.

В продолжение работы с программой имеет смысл отобразить примерные зоны отражения радиоволн для размещенных радиолокаторов. Однако при работе с программой следует избегать загромождения рабочей области. В таком случае имеет смысл очистить рабочее поле нажатием соответствующей кнопки.

После отображения всех необходимых элементов системы ЗГО программа позволяет провести ряд расчетов, а именно: рассчитать площадь ответственности размещенных радиолокаторов, рассчитать зону отражения радиоволн и рассчитать площадь ответственности размещенных ионозондов. Расчеты производятся из условий стандартной дальности действия РЛС ЗГО (от 1000 до 3000 км) и заданного сектора обзора по азимуту.

В завершении расчета программа дает возможность сформировать отчет по введенным данным, а также сохранить снимок экрана, демонстрирующий взаимное расположение добавленных элементов. Снимок в формате .png и отчет в формате .rtf сохраняются в каталог \gerort корневого каталога программы указанием времени сохранения. Это в первую очередь позволяет указывать уникальные названия файлов для исключения совпадения названий.

Результатом работы программы является смоделированная система ионосферного обеспечения РЛС ЗГО в виде изображения на карте взаимного расположения элементов системы (РЛС, ионозондов, зон ответственности, трасс НЗ), а также отчета, в котором приведены параметры этой системы. В задачи программы не входит оценка ошибок.

Таким образом, разработано программное обеспечение, способное облегчить разработку системы ионосферного обеспечения при проектировании РЛС ЗГО. Внедрение разработанного приложения в работу соответствующих разработчиков поможет оптимизировать проектирование системы ЗГО, а также модернизировать уже существующие. На отдельные модули программы получено авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [4, 5].

### Заключение

По-прежнему важной задачей является изучение ионосферы и определение параметров для практического использования, в том числе в интересах ЗГО. Предложенная система подстройки под ГФУ позволит увеличить точность работы РЛС ЗГО, во-первых, за счет более грамотного выбора рабочей частоты, во-вторых, за счет определения действующей высоты отражающего слоя ионосферы. Ключевой составляющей такой системы являются вынесенные позиции, оснащенные вертикально-наклонными ионозондами. Проведенные при непосредственном участии автора эксперименты показали, что отечественные импульсные ионозонды «Парус-А» способны выполнять такое зондирование [6]. Существующая сеть ионозондов может служить источником данных ВЗ и сигналов НЗ для РЛС, однако это требует практического подтверждения. Применение предложенной СПГУ позволит избавиться от статистической ошибки определения координат, практически сведя ее к нулю.

Разработана программа моделирования системы вынесенных позиций (ионозондов) как части СПГУ, способная оптимизировать работу при разработке систем радиолокационного ЗГО.

### Литература

1. Щирый А. О. Комплексное имитационное моделирование для отладки и проведения испытаний адаптации горизонтных радиолокационных станций декаметрового диапазона к геофизическим условиям / А. О. Щирый // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование, теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание) ; Санкт-Петербург, 20 – 22 октября 2021 года – Санкт-Петербург : АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. – С. 520 – 527.
2. Многофункциональная радиолокационная станция повышенной дальности обнаружения [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aorti.ru/competencies/radar-system/mrls/>.
3. Litvinov S. Over-the-horizon detection radar ionosphere support system / S. Litvinov // Journal of Physics: Conference

Series, Murom, 23 – 25 июня 2020 года. – Murom, 2020. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1632/1/012021.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2022665262 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования системы загоризонтного радиолокационного обнаружения (OTHR-Model) : № 2022664224 / С. В. Литвинов, Ю. А. Полева, В. Ю. Салеев, Р. В. Горбунов.

5. Крауз П. В., Панкратьев В. С., Шарданов К. Б. Метод вычисления систематической ошибки по траекторной информации в радиолокационной системе пространственной волны коротковолнового диапазона // РТИ Системы ВКО – 2015 : Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 28 мая 2015 года. – Москва: Московский государственный технический

университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 198 – 201. – EDN HVGIBU.

6. Репозиторий GitHub [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/judero01col/GMap.NET>.

7. Jindalee Over-the-horizon Radar, Nomination for Heritage Recognition, May 2016, p. 79.

8. Nostradamus: An OTH Radar / V. Bazin [et al.] // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – Vol. 21. – No. 10. – Pp. 3 – 11. – Oct. 2006. – DOI: 10.1109/MAES.2006.275299.

9. РД 52.26.817-2015 «Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения», Обнинск ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» 2015 – 200 с.

Поступила в редакцию 22.06.2022

*Святослав Викторович Литвинов, преподаватель кафедры РЭСК, т. (499) 215-65-65, e-mail: litvinov\_s@mirea.ru. (МИРЭА – Российский технологический университет).*

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION PROGRAM FOR AN IONOSPHERIC SUPPORT SYSTEM FOR AN OTH-RADAR

S. V. Litvinov

*The article discusses the relevance of over-the-horizon radar and the need to provide information about the current parameters of the ionosphere. The construction of such a system of ionospheric support is considered. The process and results of development of a computer program for modeling such a system are given. The program is implemented using Gmap.NET library in C# programming language in Microsoft Visual Studio integrated development environment.*

**Keywords:** ionosphere, over-the-horizon radar, ionosphere information, software, modeling, C#, Microsoft Visual Studio.

### References

1. Shchiriy A. O. Integrated simulation modeling for debugging and testing the adaptation of over-the-horizon radar stations decimeter range to geophysical conditions / A. O. Shchiriy // Proceedings of the conference (electronic publication), St. Petersburg, 20 – 22 October 2021 – St. Petersburg : JSC «Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology», 2021. – С. 520 – 527.

2. Multifunctional radar station of increased detection range [Electronic resource]. – URL: <https://www.aorti.ru/competencies/radar-system/mrls/>.

3. Litvinov S. Over-the-horizon detection radar ionosphere support system / S. Litvinov // Journal of Physics: Conference Series, Murom, June 23 – 25, 2020. – Murom, 2020. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1632/1/012021.

4. Copyright certificate No. 2022665262 Russian Federation. Simulation simulation program for the over-the-horizon radar detection system (OTHR-Model) : № 2022664224 : declar. 29.07.2022 : publ. 12.08.2022 / S. V. Litvinov, Yu. A. Polevoda, V. Yu. Saleev, R. V. Gorbunov.

5. Krauz P. V., Pankratev V. S., Shardanov K. B. The systematic error calculation method by using the flight path information in the hf sky-wave radar// RTI Systems VKO – 2015 : Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, May 28, 2015. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2015. – С. 198 – 201. – EDN HVGIBU.

6. GitHub repository [Electronic resource]. URL: <https://github.com/judero01col/GMap.NET>.

7. Jindalee Over-the-horizon Radar, Nomination for Heritage Recognition, May 2016. –79 p.

8. V. Bazin et al., Nostradamus: An OTH Radar in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – Vol. 21. – No. 10, Pp. 3 – 11. – Oct. 2006. DOI: 10.1109/MAES.2006.275299.

9. RD 52.26.817-2015 Guidelines for ionospheric, magnetic and heliogeophysical observations. Part I. Ionospheric observations, Obninsk FGBU «VNIIGMI-MDC» 2015 - 200 p.

*Svyatoslav Viktorovich Litvinov, lecturer at the Department of RSC, tel. (499) 215-65-65, e-mail: litvinov\_s@mirea.ru. (MIREA – Russian Technological University).*