

## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОБРАБОТКИ, ОТОБРАЖЕНИЯ И АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИСЗФ СО РАН

Н.А. Громик, В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Российской Федерации, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.126А, а/я 291  
E-mail: gromik@iszf.irk.ru

**Аннотация.** В ИСЗФ СО РАН накоплены на протяжении 70 лет огромный банк данных, полученных с помощью радиофизических инструментов, и многолетний опыт их анализа с привлечением различных моделей атмосферы и ионосферы. Для проведения комплексных исследований атмосферных и ионосферных явлений требуется сопоставление данных различных инструментов, их предварительный анализ и корректировка, моделирование изучаемых процессов. В связи с этим назрела необходимость создать информационно-аналитическую систему (IAS), реализующую доступ к данным каждой научной установки и предоставляющую инструменты для их визуализации и анализа. Нами разработана ИАС, использующая новый подход к комплексным обработке, отображению и анализу научных данных с учётом специфики геофизических исследований, проводимых в ИСЗФ СО РАН. Система реализована в виде Web-приложения, вычислительное ядро которого модульное. В систему встроены на уровне исходного кода популярные полуэмпирические модели ионосферы (IRI, NeQuick), магнитного поля (IGRF, WMM), нейтральной атмосферы (NRLMSIS) и горизонтального ветра Земли (HWM), реализованы единый интерфейс и набор интерактивных инструментов для взаимодействия с ними. В настоящее время система имеет доступ к данным измерений ионозондов наклонного зондирования (НЗ) и Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР), которые вместе с использованием моделей объединяются во многочисленных приложениях, реализованных в ИАС, для моделирования распространения УКВ-радиосигналов в атмосфере Земли. ИАС упрощает и ускоряет использование моделей и данных и решает широкий круг научных, исследовательских и образовательных задач. Благодаря своей модульности ИАС может расширяться, и при необходимости в ней могут быть добавлены новые модели среды и процессы, связанные с распространением радиоволн. Реализованные на данный момент функции позволяют корректировать получаемые с помощью инструментов ИСЗФ СО РАН параметры моделей и уточнять параметры глобальных моделей ионосферы. ИАС может также использоваться в качестве платформы для проведения студенческих практикумов и научных интенсивов.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн; УКВ; модель атмосферы; информационно-аналитическая система; Web-приложение; база данных; визуализация; научные данные; программное обеспечение

## INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR OBTAINED BY ISTP SB RAS RADIOPHYSICAL FACILITIES GEOPHYSICAL DATA COMPREHENSIVE PROCESSING, DISPLAYING AND ANALYSIS

N. A. Gromik, V. A. Ivonin, V. P. Lebedev

**Abstract.** ISTP SB RAS has accumulated a huge database obtained using radiophysical instruments and many years of experience in analyzing them using various models of the atmosphere and ionosphere. To carry out complex studies of atmospheric and ionospheric phenomena, a comparison of data from various instruments, their preliminary analysis and correction, and modeling of the processes being studied are required. In this regard, there is a need to create an information and analytical system (IAS) that implements access to data from each scientific facility and provides tools for its visualization and analysis. We have developed an IAS that uses a new approach to scientific data complex processing, display, and analysis, taking into account the geophysical research conducted at ISTP SB RAS specifics. The system is implemented in the form of a Web application, the computing core of which is modular. Popular semi-empirical models of the ionosphere (IRI, NeQuick), magnetic field (IGRF, WMM), neutral atmosphere (NRLMSIS) and horizontal wind (HWM) of the Earth are built into the system at the source code level; a single interface and a set of interactive tools for interacting with them are implemented. The system currently has access to measurement data from oblique sounding ionosondes and the Irkutsk Incoherent Scatter Radar, which, along with the use of models, are combined in numerous applications implemented in the IAS to simulate the VHF radio signals propagation in the Earth's atmosphere. The IAS simplifies and accelerates the use of models and data and solves a wide range of scientific, research and educational tasks. Due to its modularity, the IAS can be extended, and, if necessary, models of the environment and process-

es related to radio wave propagation can be added. The currently available functionality allows to correct the model parameters obtained by using the ISSP SB RAS instruments and to specify the global ionosphere models parameters. IAS can be used as a platform for student workshops and scientific intensives.

**Keywords:** radio wave propagation; VHF; atmospheric model; information and analytical system; web application; database; visualization; scientific data; software

## Введение

В процессе изучения различных геофизических систем, таких как атмосфера Земли, геомагнитное поле и т.д., происходит накопление больших объёмов данных, полученных с помощью различных методов исследования: радиофизических, оптических, *in situ*. Впоследствии в процессе обработки, систематизации и анализа этих данных создаются модели исследуемых объектов, которые далее используются для интерпретации и анализа вновь полученных данных. В последнее время поток получаемых данных стремительно увеличивается, к тому же за последние 90 лет с развитием радиофизических методов исследования и технологий хранения информации (как в цифровом, так и в аналоговом виде) уже накоплен огромный массив данных, а также разработано множество моделей среды. В связи с этим возникает ряд проблем, требующих решения.

Во-первых, для эффективных анализа и обработки данных к ним должен быть быстрый и удобный доступ, т.е. должны быть организована система хранения данных и реализован способ доступа и просмотра, а это требует либо унификации формата хранения, что значительно сужает количество источников данных, либо реализации в такой системе чтения, обработки и визуализации нескольких форматов, что затрудняет разработку и поддержку такой системы.

Во-вторых, моделей среды существует довольно много, и каждая из них имеет свои особенности, начиная от языка программирования, на котором она реализована, и заканчивая форматом получаемой с помощью неё информации. Некоторые модели разрабатываются уже более полувека, в связи с чем исходный код устаревает и накапливает ошибки и особенности, которые нужно учитывать при использовании модели [1]. Многие научные сотрудники, которые являются потребителями этих моделей, не имеют возможности ради запуска той или иной модели осваивать новый для себя язык программирования и разбираться в нюансах компиляции исходного кода модели и её использования, из-за чего модели применяются не так эффективно, как могли бы.

В качестве решения обозначенных проблем в ИСЗФ СО РАН разрабатывается ИАС для комплексных обработки, отображения и анализа геофизических данных, полученных на радиофизических средствах института. Опираясь на многолетний опыт работы с данными, накопленный в институте, опыт использования моделей атмосферы Земли и взаимодействия с уже существующими системами и средствами, разработчики ИАС создали инструмент, который во многом лишен недостатков существующих аналогов и уже используется в научной и преподавательской работе.

## Описание архитектуры ИАС

Для соответствия программного комплекса критериям оперативности, модульности, производительности, устойчивости, гибкости и масштабируемости, была выбрана клиент-серверная архитектура [2]. Взаимодействие между клиентом и сервером реализовано через REST API. Для обработки входящих HTTP-запросов используется фреймворк FastAPI. Математическое моделирование среды и физических процессов производит вычислительное ядро (ВЯ), состоящее из предварительно скомпилированных на языках C, C++, Fortran модулей.

Разнообразие моделей, используемых в ИАС, создаёт определённые сложности:

- неоднородность реализации моделей, т.к. разработка каждой модели производилась разными командами на различных языках программирования;
- наличие уникальных ограничений моделей, а передача некорректных или выходящих за допустимые рамки данных может вызвать критические ошибки: например, ошибки сегментации памяти;
- критические ошибки компилируемого модуля могут привести к сбоям сервера, задержкам ответов и возникновению ошибок времени ожидания.

Для минимизации рисков внедрён подход к изолированному выполнению моделей. Его основные преимущества:

- модели запускаются в отдельных процессах, исключая влияние на основной сервер;
- поддерживается использование временных входных и выходных файлов без загрязнения рабочего окружения;
- длительные вычисления выполняются в фоне с возможностью контроля потребления ресурсов (процессор, память).

Изоляция реализована с помощью программного пакета Docker, что обеспечило надёжную защиту среды исполнения, эффективное управление ресурсами и повысило общую отказоустойчивость системы. Благодаря этому значительно улучшены стабильность и производительность ИАС при работе с большими объёмами данных.

Взаимодействие пользователей с системой осуществляется через веб-интерфейс, реализованный в виде одностраничного приложения (SPA). Такая архитектура обеспечивает высокую отзывчивость и динамичное взаимодействие с интерфейсом без необходимости перезагрузки страницы.

### Описание возможностей ИАС

Ключевая особенность ИАС — возможность использования и визуализации результатов выполнения множества видов моделей атмосферы Земли посредством единообразного интерфейса. На данный момент в ИАС доступны следующие модели: ионосфера (полуземпирические модели IRI-2016, NeQuick 2, NeQuick-G и 9 аналитических моделей высотного слоя  $N_e$ ), геомагнитного поля (IGRF-13, WMM2020, дипольная), нейтральной атмосферы (NRLMSIS 2.1), горизонтального ветра (HWM14) и показателя преломления тропосферы (экспоненциальная). На рис. 1 приведён пример долготно-широтного профиля  $N_e$  ионосферы по модели IRI-2016, полученный и отображаемый с помощью ИАС.

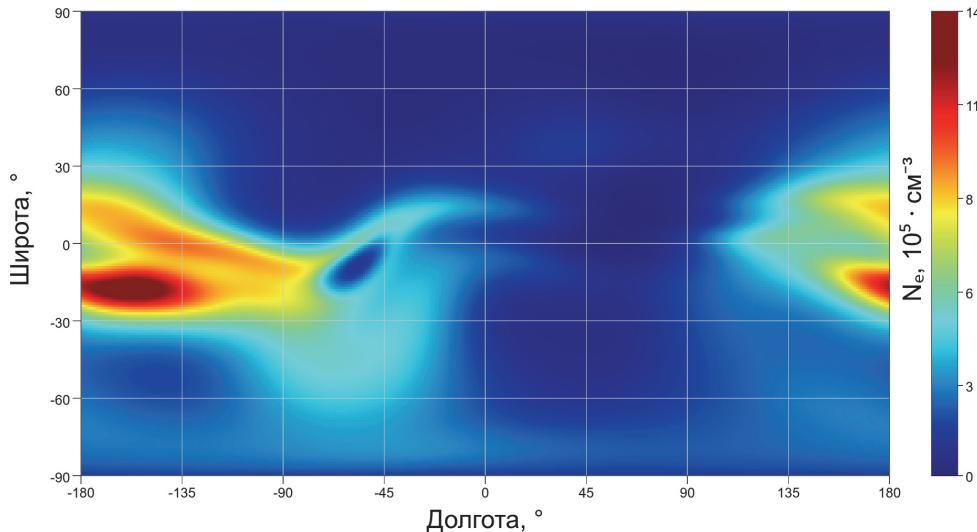


Рис. 1. Полученный и визуализированный в ИАС профиль  $N_e$  по модели IRI-2016 20.12.2024 20:15 UT на высоте 300 км

ИАС также позволяет решать широкий круг задач распространения радиоволн в атмосфере:

- моделирование радиоканала в УКВ-диапазоне с учётом среды распространения [3]: моделирование эффектов Фарадея и Коттона-Мутона, расчёт ионосферных поправок координатной и некоординатной информации наблюдаемых космических объектов (КО), учёт перемещающихся ионосферных возмущений; построение ракурсной поверхности;
- фитирование профиля электронной концентрации ( $N_e$ ) ионосферы в данные ИРНР как в автоматическом режиме, так и с привлечением оператора (корректировка результатов автоматического фитирования [4]). Взаимодействие с базой данных результатов измерений ИРНР и ионозонда DPS-4 [5];

- исследование верхней ионосферы (topside). Реализовано фитирование модели topside в данные как ИРНР, так и в данные ГНСС [6] (взаимодействие с SIMuRG [7]);
- исследование различных параметров атмосферы по различным профилям: высотный, широтный, долготный, временной и различные комбинации данных профилей;
- исследование тонкой структуры радиолокационного сигнала от КО.

### **Заключение**

Разработанная ИАС является комплексным решением для хранения, анализа и фильтрации данных наблюдений радиофизических инструментов. Наличие ряда внедрённых в ИАС атмосферных моделей от сторонних разработчиков позволяет производить анализ и верификацию полученных экспериментальных данных. БД позволяет оперативно предоставлять доступ к срезам накопленных геофизических данных в различных временных масштабах.

Модульная архитектура ИАС позволяет эффективно распределять трудозатраты для реализации различных компонентов системы, отключать или модернизировать их обособленно от остального функционала. Такое решение уже сейчас позволяет достаточно быстро интегрировать в ИАС новые модели.

ИАС совершенствуется, тестируется и модернизируется, а её применение для проведения образовательных мероприятий со студентами, решения рабочих задач, в демонстрационных целях на конференциях, позволяют держать “руку на пульсе” современного стека программных решений. В настоящее время ведутся работы для повышения эффективности внедрения моделей сторонних разработчиков.

### **Благодарности**

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» <http://ckp-rf.ru/usu/77733/>. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-Г3/Ц3569/278).

### **Список литературы**

1. V.A. Ivonin, V.P. Lebedev and Y.V. Yasyukevich. Modification of IRI-2016 source code: improvements, parallelization // 2024 4th URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC), Meloneras, Spain, 2024. – Р. 1–4, DOI: 10.46620/URSIATRASC24/COMM1727.
2. Лиманова, Н.И. Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры / Н.И. Лиманова, И.А. Селезнев // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Т. 8, № 7. – С. 392–396. – DOI: 10.33619/2414-2948/80/37.
3. V.A. Ivonin and V.P. Lebedev. Simulation of Radar Signals in the VHF Range, Taking Account of Their Propagation Effects in the Troposphere and Ionosphere // 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China, 2021. – Р. 2519–2525. DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9695088.
4. Алсаткин С.С. Особенности метода восстановления  $N_e$  на Иркутском радаре некогерентного рассеяния / С.С. Алсаткин, А.В. Медведев, К.Г. Ратовский // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 97–110. DOI: 10.12737/szf-61202009.
5. N.A. Gromik, V.A. Ivonin, V.P. Lebedev and E. A. Trofimov, "Information-Analytical System for Analyzing Experimental Data of Ionospheric Sounding," 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2024. – Р. 106–109, DOI: 10.1109/RMC62880.2024.10846864.
6. Оценка электронного содержания плазмосферы и высоты перехода O+/H+ во время геомагнитной бури в феврале 2022 г. по данным Иркутского радара НР / Д.С. Хабитуев, Г.А. Жеребцов, В.А. Ивонин, В.П. Лебедев // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 31–40. – DOI: 10.12737/szf-104202404.
7. Yasyukevich, Y.V., Kiselev, A.V., Zhivetiev, I.V. et al. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS. GPS Solut 24, 69 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2>.