

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-225-233

УДК 004.92

Программная система пространственной визуализации прогностических и ретроспективных данных вероятности наблюдения полярных сияний

Андрей Владимирович Воробьев¹, Гульнара Равилевна Воробьева²✉,
Ольга Игоревна Христодуло³

^{1,2,3} Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008, Российская Федерация

¹ Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация

¹ geomagnet@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

² gulnara.vorobeva@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0001-7878-9724>

³ o-hristodulo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3987-6582>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты разработки общедоступного веб-ориентированного инструментария, функционирующего в прогностическом и ретроспективном режимах и обеспечивающего пользователя интерактивным инструментом мониторинга пространственных данных на примере визуализации вероятности наблюдений полярных сияний. **Метод.** Предложен алгоритм веб-рендеринга пространственных изображений, обеспечивающего повышение реактивности веб-приложений за счет формирования визуализируемого слоя на серверной стороне, в отличие от известных подходов, когда задача интерполяции и генерации пространственного слоя решается на уровне клиента. **Основные результаты.** Выполнено описание архитектуры программной системы, отличительная особенность которой — комбинирование различных паттернов веб-программирования от монолитного приложения до микросервисного с элементами модульной архитектуры по типу «модель–представление–контроллер». Экспериментальные исследования позволили установить повышение скорости рендеринга пространственного изображения в среднем в 8,1 раза. **Практическая значимость.** Рассмотренный подход к визуализации применительно к геофизическим параметрам в области аврорального овала обеспечивает повышение эффективности исследования динамики, что дает возможность выявить новые знания о топологии магнитосферы, в том числе при ее изменениях во время геомагнитных бурь и суббурь.

Ключевые слова

веб-программирование, пространственные данные, пространственная визуализация, геоинформационные системы и технологии, обработка данных

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00011а, РФФИ № 21-77-30010, экспертного центра «Проектный офис развития Арктики» (договор № 217-Г от 13 января 2021 г.), Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ # FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах».

Ссылка для цитирования: Воробьев А.В., Воробьева Г.Р., Христодуло О.И. Программная система пространственной визуализации прогностических и ретроспективных данных вероятности наблюдения полярных сияний // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 225–233. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-225-233

An information system for spatial visualization of prognostic and retrospective data on the probability of observing auroras

Andrei V. Vorobev¹, Gulnara R. Vorobeva²✉, Olga I. Khristodulo³

^{1,2,3} Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296, Russian Federation

¹ geomagnet@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

² gulnara.vorobeva@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0001-7878-9724>

³ o-hristodulo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3987-6582>

Abstract

The paper presents the results of the development of an open-access web-based system operating in predictive and retrospective modes and providing the user with an interactive tool for monitoring spatial data using the example of visualizing the probability of observing aurora borealis. The work proposes an algorithm for web rendering of spatial images, which provides an increase in the reactivity of web applications due to the formation of a rendered layer on the server side, in contrast to the known approaches solving the problem of interpolation and generation of a spatial layer at the client level. The paper describes the architecture of the information system whose distinctive feature is the combination of various patterns of web programming, i.e. from a monolithic application to a microservice one with elements of a modular architecture of the “model–view–controller” type. The experimental studies allowed establishing an increase in the rendering speed of a spatial image by an average of 8.1 times. The results of the studies have shown that the considered approach to visualization as applied to the geophysical parameters in the region of the auroral oval will provide an increase in the efficiency of studying the dynamics of the auroral oval, which will help to reveal new knowledge regarding the topology of the magnetosphere and its changes, for example, during geomagnetic storms and substorms.

Keywords

web programming, spatial data, spatial visualization, geographic information systems and technologies, data processing

Acknowledgements.

The reported study was funded by RFBR, project number 20-07-00011a, RSF, project number 21-77-30010; and the Expert Center “Project Office for the Development of the Arctic” (Agreement No. 217-G dated January 13, 2021), and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the basic part of the state assignment to higher education educational institutions # FEUE-2020-0007.

For citation: Vorobev A.V., Vorobeva G.R., Khristodulo O.I. An information system for spatial visualization of prognostic and retrospective data on the probability of observing auroras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 225–233 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-225-233

Введение

Под воздействием заряженных частиц солнечного ветра в верхних слоях атмосферы наблюдается свечение, известное как полярное сияние. Его пространственные области — авроральные овалы — имеют вид светящихся, несколько деформированных и смещенных на ночную сторону колец вокруг магнитных полюсов в северном и южном полушариях Земли [1]. Комплекс геофизических параметров, наблюдаемых в этой области, является одним из индикаторов вариаций гелиогеофизической обстановки, оказывающих крайне негативное воздействие на технические объекты и системы (радио, навигация, электросети, трубопроводы, геологоразведка, маркшейдерские работы и др.) [2–5].

В настоящее время прогноз значений геофизических параметров в области аврорального овала выполняется на основе ряда математических моделей, исходными данными которых являются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, регистрируемые в режиме реального времени спутником ACE, а с 2016 г. также и спутником DSCOVR [6]. Известны и применяются эмпирические модели OVATION (Oval Variation, Assessment, Tracking, Intensity, and Online Nowcasting) краткосрочного прогноза глобального интегрированного излучения энергии и Веймера для расчета электрического и магнитного потенциала в авроральной зоне и определения границ аврорального овала [6–8].

С точки зрения программных систем, интерес представляют сервисы, предоставляемые провайдерами геофизических данных. Наибольшей популярностью пользуется сервис краткосрочного прогноза полярных сияний по модели OVATION¹ [9, 10], предоставляемый Центром прогнозов космической погоды Национального управления океанических и атмосферных исследований (Space weather prediction center of National oceanic and atmospheric administration, SWPC NOAA). Данные оперативные и обновляются каждые 5 мин. Особенность сервиса — двойственный протокол взаимодействия:

- 1) веб-сайт, на котором представлены снимки двух карт — северного и южного полюсов, на которых показаны местоположение и вероятность наблюдения полярного сияния;
- 2) API для HTTP-доступа к данным краткосрочного прогноза в формате JSON, что делает его применение эффективным для использования в интерфейсе типа «программа–программа» [6].

Другой пример — ряд опенсорсных программ, реализующих алгоритмы пространственной визуализации в различных средах. Большинство из проектов доступ-

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast> (дата обращения: 10.02.2021).

ны в репозиториях GitHub, например, проект «leblancfg/auroga»¹, обеспечивающий визуализацию геофизических параметров аврального овала по данным SWPC NOAA в десктоп-приложении на языке программирования Python.

В результате работы известных программных решений можно выделить следующие основные недостатки: при получении статичных пространственных изображений отсутствует поддержка интерактивного взаимодействия с пользователем. Как следствие, потребности данных сталкиваются с невозможностью динамического масштабирования изображения и применения дополнительных пространственных слоев; отсутствуют базовые инструменты для пространственного анализа визуализированных параметров (обратное геокодирование, измерение расстояния и площади регионов и пр.); доступны только текущие прогностические данные (из расчета на последующие 5 мин), а ретроспективный анализ невозможен.

Таким образом, актуальна разработка общедоступного веб-ориентированного сервиса, обеспечивающего интерактивный пользовательский интерфейс для визуализации прогностических и ретроспективных геофизических данных в области аврального овала, а также позволяющего проводить их оперативный и ретроспективный анализ с целью повышения эффективности мониторинга и прогнозирования гелиогеофизической обстановки. Очевидно, что современные геоинформационные технологии и сопутствующие программные среды/библиотеки могут обеспечить такую разработку эффективной базой, открытой для последующего развития и масштабирования.

Краткая характеристика программной системы

Задача визуализации пространственного распределения прогностических и ретроспективных данных о вероятности наблюдения полярных сияний решена посредством разработанной веб-ориентированной системы (веб-приложения)² (рис. 1) [11]. Пространственно-атрибутивный характер анализируемой при этом информации обуславливает применение стека геоинформационных технологий, обеспечивающих на программном уровне динамическую интерполяцию и визуализацию исходных данных.

Ключевой идеей системы является визуализация на виртуальном глобусе слоя пространственных изолиний, характеризующих местоположение и вероятность наблюдения полярных сияний в соответствии с указанными пользователем временными параметрами [12]. Отличительной особенностью при этом является возможность визуализации данных, хронологически предшествующих оперативной информации, посредством предварительной фильтрации доступных временных интервалов, для которых на сервере имеются соответствующие наборы данных. Интерактивность пользовательской работы с приложением обеспечивается комплексом геоинформационных средств — функцией обратного геокодирования, динамическим масштабированием, измерительными инструментами.

В дополнение к обозначенным возможностям в разработанной системе представлены временные диаграммы распределения параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, характеризующие суточные вариации гелиогеофизической обстановки в режиме реального времени.

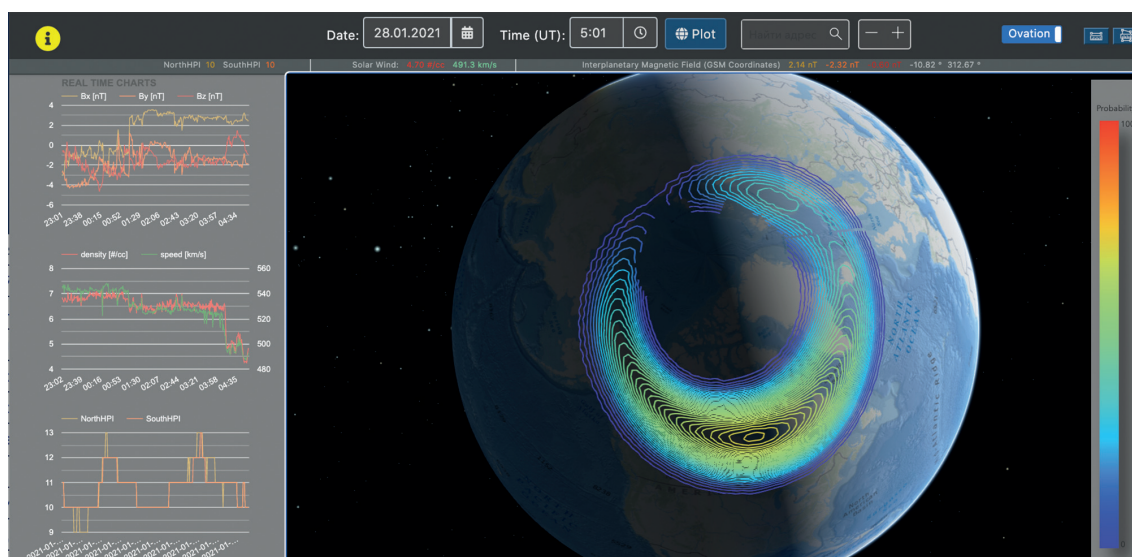


Рис. 1. Экранная форма системы визуализации данных о вероятности полярных сияний

Fig. 1. Screen form of the auroral probability data visualization system

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/leblancfg/auroga> (дата обращения: 10.02.2021).

² [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://aurora-forecast.ru/> (дата обращения: 10.02.2021).

С точки зрения программной формализации, отличительной особенностью предложенной системы является алгоритм визуализации пространственных данных, который позволяет повысить скорость клиентского рендеринга за счет отделения процедур интерполяции данных и формирования набора с их изолиниями полностью на серверную сторону приложения.

Обобщенная архитектура программной системы

Реализация разработанной программной системы основана на клиент-серверной архитектуре, с отделением бизнес-логики и данных от пользовательского интерфейса (рис. 2). Сценарии на серверной стороне отвечают за взаимодействие с провайдерами данных и обработку поступающих от них потоков информации. Задачей клиентских сценариев является рендеринг этих данных в виде набора пространственных изображений. Взаимодействие между уровнями осуществляется по протоколу HTTP(S) посредством обмена сообщениями. Базовый картографические данные передаются по HTTP-протоколу с сервера WMS (Web Map Service), при этом визуализируемые данные представлены в формате JSON (JavaScript Object Notation).

В общем виде процесс функционирования системы можно описать следующим образом. На протяжении всего жизненного цикла приложения фоновые

процессы на серверной стороне реализуют процедуру взаимодействия с распределенными провайдерами данных. По заданному протоколу с 5-минутным интервалом устанавливаются сеансы соединения с сервисами провайдеров, в рамках которых осуществляется запрос данных, их обработка и размещение в облачном хранилище. В качестве последнего используется вариант облачных услуг PaaS-типа, преимуществами которого является возможность гибкого масштабирования и полнофункциональная поддержка со стороны соответствующих API (Application Programming Interface) [13].

Далее на серверной стороне выполняется обработка регулярной сетки посредством преобразования ее в JSON-массив [14] вида «координаты — атрибутивные значения» для заданной временной метки. Обработка данных выполняется по результатам запроса к облачному хранилищу в соответствии с временными характеристиками, которые были получены в теле пользовательского запроса.

Формируемый массив пространственных координат и атрибутивных значений поступает на вход модуля для обработки регулярной сетки. Здесь выполняется операция интерполяции данных в соответствии с алгоритмом триангуляции Делоне и построение набора изолиний на этой основе. Множество изолиний в виде потока JSON-данных передается в форме серверного отклика на клиентскую сторону приложения.

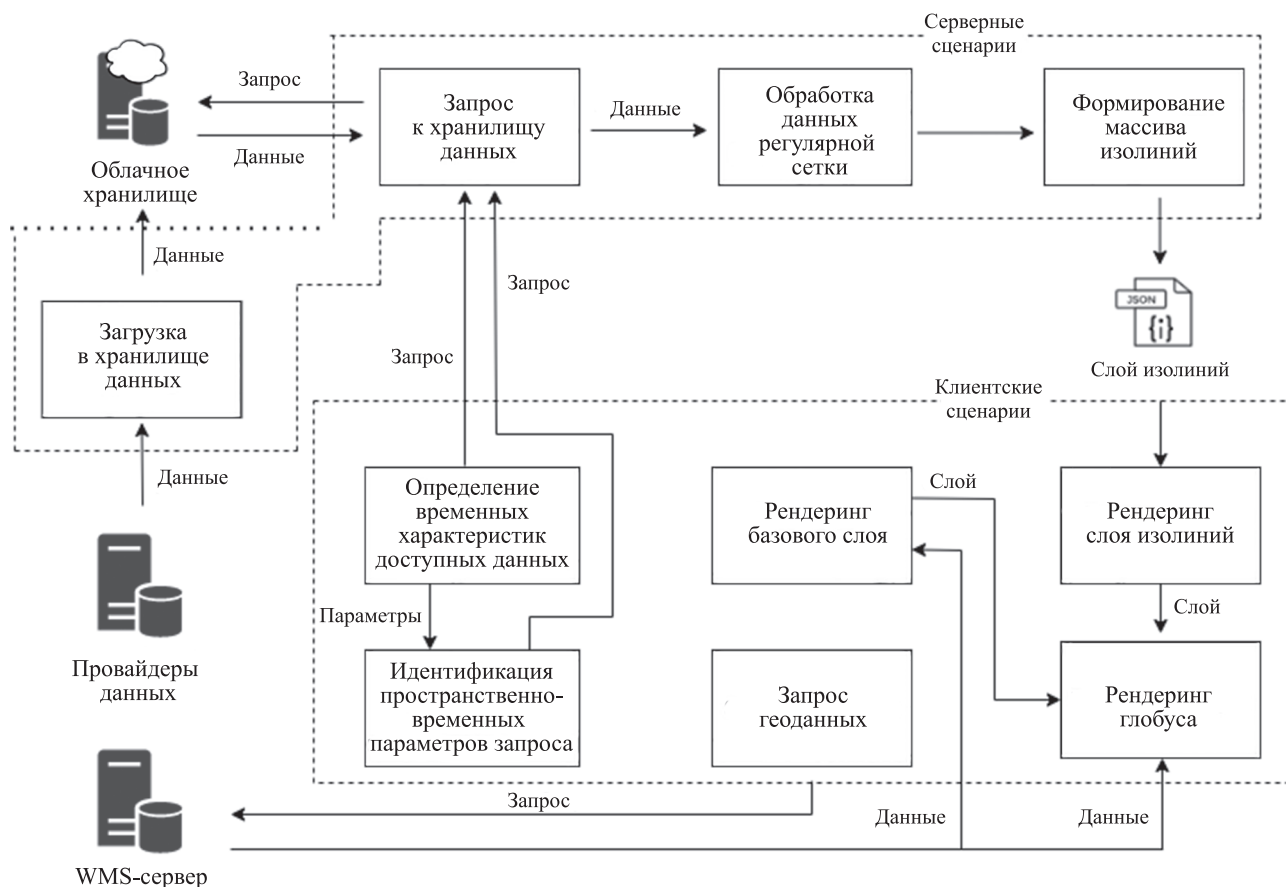


Рис. 2. Архитектура программной системы визуализации вероятности полярных сияний

Fig. 2. Architecture of the information system for visualization of the probability of aurora

Дальнейшая обработка данных осуществляется посредством клиентских сценариев веб-приложения на основе микросервисной архитектуры [15]. Сначала выполняется последовательный обмен сообщениями между клиентом и сервером на предмет того, какими временными характеристиками обладают доступные для визуализации наборы пространственных данных. На основании серверного отклика создается массив допустимых для формирования запроса временных параметров (дата и время в UT (Universal Time — Всемирное время)), что отображается в пользовательском элементе управления (календарь, библиотеки класса Tempus Dominus).

Одновременно с этим выполняется прорисовка виртуального глобуса и рендеринг на нем базового слоя. Для этого используются классы ArcGIS API for JS, одни из которых отвечают за создание и визуальное представление глобуса в окне браузера, другие — за запрос к WMS-серверу за данными базового слоя. Интеграция компонент представляет собой основу для визуализации запрашиваемых пространственных данных.

Выделенные серверным ответом и пользовательским выбором временные параметры передаются на серверную сторону GET-запросом в асинхронном режиме. После обработки запроса серверные сценарии возвращают на клиентскую сторону соответствующие GeoJSON-данные. Последние, в свою очередь, визуализируются слоем, рендеримым на базовой подложке виртуального глобуса.

Предварительная обработка исходных данных

В качестве исходных для системы использованы данные, предоставляемые сервисом SWPC NOAA по HTTP-протоколу. Для их обработки разработана подсистема сбора данных, основанная на принципе консолидации данных в единое информационное хранилище. Недостаток подхода, связанный с избыточностью хранения данных в выделенном хранилище, компенсируется независимостью системы от доступности источников. При этом базовыми выступают территориально распределенные источники геофизических пространственных данных (сервисы SWPC NOAA), где, в соответствии с предоставляемой ими информацией, каждому атомарному объекту (пространственной точке с заданными географическими координатами) соответствует значение, характеризующее вероятность возникновения в локации полярного сияния (значение находится в диапазоне 0–100). Кроме того, другие базовые источники предоставляют информацию о параметрах солнечного ветра, авроральной активности и межпланетном магнитном поле, временная метка которых соответствует данным о вероятности полярного сияния.

На программном уровне провайдеры указанных данных представляют собой веб-ориентированные сервисы, которые в соответствии с заданными протоколами взаимодействия обеспечивают доступ потребителей к располагаемым ими данным. Фактически подсистема сбора данных представляет собой промежуточное

звено — медиатор — между базовыми источниками геофизических данных и тем хранилищем, которое является по сути единым для разработанного приложения. Взаимодействие осуществляется в формате «запрос–ответ», а результатом его выполнения является заполнение единого информационного хранилища. Для автоматизации решения этой задачи программные сценарии выполняются с помощью процессов-демонов, функционирующих по принципу Cron. Для этого задается событие-триггер (в данном случае триггером является истечение заданного периода времени — 5 мин), определяется процесс-демон, и далее под управлением серверной операционной системы используемого хостинга задаются «работы» (jobs) для Cron-процессов, запускаемые на выполнение в соответствии с указанным триггером.

Возможность обращения к сторонним источникам данных на уровне серверных сценариев обеспечивается специализированным расширением — cURL — реализуемым по лицензии MIT (Massachusetts Institute of Technology) и позволяющим взаимодействовать с серверами различного типа и архитектуры под управлением одного из множества поддерживаемых при этом протоколов. Данные на сервер приложения возвращаются в формате JSON.

На следующем этапе подключается дополнительный REST API, предназначенный для работы с хранилищами данных. В рамках разработанного приложения для хранения данных используются возможности облачного хранилища Яндекс.Диск, поэтому реализация взаимодействия с облачным хранилищем реализована PHP SDK для Яндекс-диска. Он основан на REST API Яндекс-диска, а фактически представляет вызов удаленных процедур посредством обычного HTTP-запроса (REST-запроса). Указанный PHP SDK для аутентификации использует соответствующий OAuth-токен, который можно сгенерировать непосредственно с применением сервиса хранилища.

Основной единицей модуля является ресурс — экземпляр соответствующего класса PHP SDK. Ресурс принимает входными параметрами OAuth-токен и путь к директории облачного хранилища. Результат операции — формирование объектно-ориентированного представления закрытого ресурса.

По запросу к провайдерам данных определяется временная метка, на основании которой формируется идентификатор директории, куда должны быть загружены файлы с данными. И, наконец, полученные от провайдеров данные в формате GeoJSON размещаются в соответствующих директориях на основании извлеченной из набора данных временной метки. Далее на этой основе создается путь к директории в облачном хранилище, куда эти данные необходимо разместить. По URL-пути проверяется существование ресурса, и в случае его отсутствия в облачном хранилище также программно создается директория. Формируется исходящий поток данных (объект класса Stream), куда записывается содержимое серверного отклика провайдеров, который направляется в экземпляр соответствующего ресурса. По завершению итерации сеанс связи закрывается.

Модели и методы пространственной визуализации

Самой вычислительно сложной процедурой в разработанном приложении является интерполяция пространственных данных и формирование слоя изолиний для последующего рендеринга на клиентской стороне. Суть решения задачи построения изолиний заключается в том, чтобы по неравномерным точечным значениям построить систему пространственных линий, соединяющих точки с равными атрибутивными значениями. Совокупность изолиний, построенных посредством интерполяции данных через заданные интервалы, позволяет дать сплошную характеристику визуализируемого процесса для пространственной области.

Обобщенная схема функционирования программного модуля формирования изолиний приведена на рис. 3. Исходными выступают GeoJSON-данные, полученные от сервера в процессе выполнения запроса с заданными временными параметрами. На их основе выполняется построение неструктурированной треугольной сетки, полученной методом триангуляции Делоне. Для реализации этого преобразования на программном уровне используется метод класса `Triangulation` библиотеки `Matplotlib.tri`. Входными являются исходные пространственные данные (X, Y) , представленные парами географических координат (широта и долгота). Выходным для данного метода является массив значений, соответствующий треугольной сетке.

На основе оригинального массива значений (атрибутивные данные Z) и полученной треугольной координатной сетки выполняется интерполяция данных. В разработанном приложении использован метод линейной интерполяции на треугольной сетке. Для программной реализации алгоритма применяется метод класса «`Linear Interpolator`» той же библиотеки `Matplotlib.tri`. На вход метод применяет результат выполнения метода `Triangulation` и исходный массив значений Z , полученный в серверном отклике. Результатом выполнения является массив интерполированных значений.

Дополнительно на основе координат X, Y формируется прямоугольная регулярная координатная сетка. Для программного решения этой задачи применяется метод `Meshgrid` класса `Numpy`, с помощью которого выполняется формирование матрицы координат из множества векторов.

Массив значений, ассоциированный со сформированной прямоугольной координатной сеткой (X', Y') , передается в качестве входных данных в созданный на предыдущем этапе интерполятор. В результате формируется массив атрибутивных значений Z' с учетом выполнения процедуры интерполяции.

Для устранения «ступенчатости» изолиний используется фильтр, позволяющий выполнить «сглаживание» изолиний в формируемом слое. В частности, применяется фильтр Гаусса, который программно реализован с помощью класса «`Gaussian Filter`» библиотеки `SciPy`. На вход данного класса поступает набор атрибутивных данных Z' после интерполяции, а результатом является фильтрованный набор данных Z'' .

Для построения изолиний в приложении используется функция `Contour` библиотеки `Matplotlib.plot`. Входными для функции являются три двумерные матрицы, описывающие прямоугольную сетку координат (данные X', Y') и значения атрибутивных данных в узлах сетки (Z''), уникальное число которых рассчитывается с помощью функции `Unique` (уникальные значения) и передается в качестве параметра `Levels` (число уровней) функции `Contour`.

Набор сформированных функцией `Contour` изолиний представлен в форме экземпляра класса `QuadContourSet`. Объект может быть визуализирован посредством языка программирования Python, но не доступен для пространственного рендеринга на клиентской стороне. В этой связи возникает задача преобразования Python-набора изолиний в формат, поддерживаемый геоинформационными технологиями обработки и визуализации пространственных данных. Таким форматом является GeoJSON. Для преобразования экземпляра класса `QuadContourSet` в исходящий в серверном отклике поток GeoJSON-данных используются возможности библиотеки `Geojsoncontour`.

Оценка качества программной системы

Оценка качества программной системы осуществлена согласно ГОСТ 28195–89¹. В соответствии с этой методикой были оценены показатели надежности, сопровождения, удобства применения, эффективности, универсальности и корректности программной системы. Тестирование выполнено в нормальных и экстремальных условиях, а также в исключительных ситуациях. Согласно результатам вычислительных экспериментов, программная система корректно выполняет свои функции. В экстремальных и исключительных ситуациях программа выдает сообщения о соответствующей ошибке и продолжает работу в штатном режиме.

Кроме того, в ходе проведения вычислительных экспериментов проведена оценка времени отклика программной системы в сравнении с практикуемым в настоящее время методом клиентского рендеринга и обработки пространственных данных.

Анализ результатов эксперимента показал, что выполнение запроса к данным и рендеринга их в виде изолиний в условиях применения персонального компьютера со средней производительностью (процессор с частотой 1,6 ГГц, 2 ядра, оперативная память 4 ГБ, скорость интернет-соединения 342,7 Мбит/с) в соответствии с предложенными решениями занимает в среднем около 6 с, что меньше времени отклика при использовании практикуемого способа, составляющего около 49 с (примерно 12,2 % от исходного времени). Характеристики веб-сервера, посредством которого приложение запускается на выполнение, следующие: 72 * Intel(R) Xeon(R) Gold 6140 CPU @ 2.30GHz.

¹ ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200009135> (дата обращения: 10.02.2021).

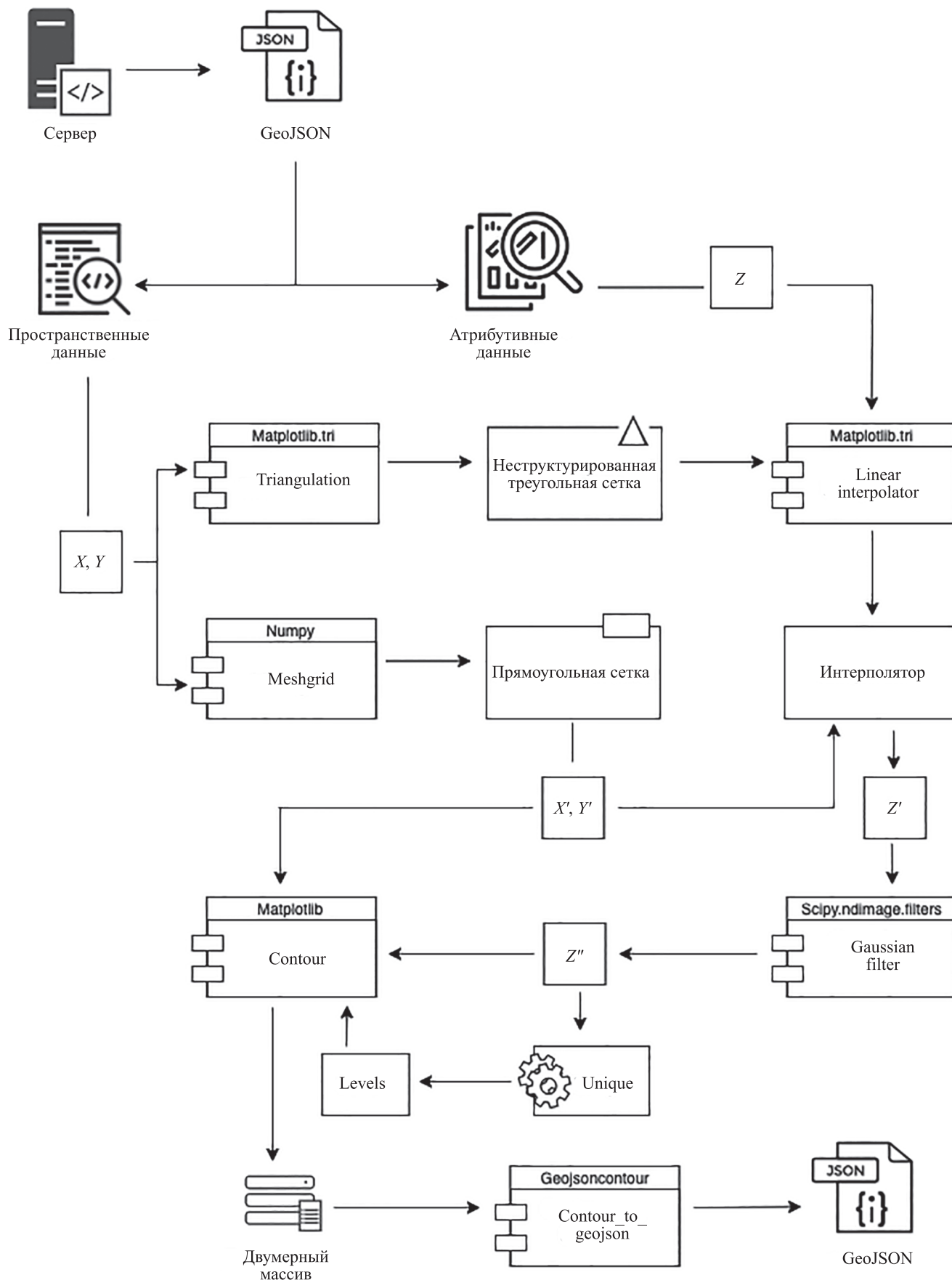


Рис. 3. Структурная схема модуля построения изолиний

Fig. 3. Block diagram of the contour plotting module

Заключение

Задача прогнозирования полярных сияний в настоящее время решается рядом научных организаций на основе известных эмпирических моделей. Однако популяризация этой информации для пользователей негеофизического профиля обусловила необходимость разработки представленной в работе программной системы. Ее отличительной особенностью стала поддержка прогнозистического и ретроспективного режимов визуализации данных о вероятности наблюдений полярных сияний в северном и южном полушариях Земли. Высокая вычислительная скорость и возмож-

ность применения данных большого объема обусловлена новизной представленной архитектуры программной системы. Предложена гибридная структура приложения, комбинирующая традиционный монолитный подход с микросервисным, что сопровождается сочетанием соответствующих программных паттернов.

Результаты ряда проведенных вычислительных экспериментов показали существенное сокращение времени отклика приложения при выполнении запроса к данным и рендеринга их в виде изолиний по сравнению с известным подходом, что свидетельствует о целесообразности применения предложенных решений.

Литература

1. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения // Физика околоземного космического пространства. Т. 3. Апатиты: ПГИ, 2000. С. 409–499.
2. Petrukovich A.A. Solar wind density effect on the night-side geomagnetic activity (AL index) // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. N 16. P. 1843–1849. doi: 10.1016/j.jastp.2006.07.004
3. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 1. С. 23–35. doi: 10.12737/5673
4. LaLone N., Tapia A., MacDonald E., Case N., Hall M., Clayton J., Heavner M. Harnessing Twitter and crowdsourcing to augment aurora forecasting // Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW, 2015. P. 9–12. doi: 10.1145/2685553.2702671
5. He F., Wei Y., Wan W. Equatorial aurora: the aurora-like airglow in the negative magnetic anomaly // National Science Review. 2020. V. 7. N 10. P. 1606–1615. doi: 10.1093/nsr/nwaa083
6. VorobeV V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G., VorobeVa G.R., Belov M.D. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // Научная визуализация. 2020. Т. 12. № 3. С. 108–118. doi: 10.26583/sv.12.3.10
7. Weimer D.R., Clauer C.R., Engebretson M.J., Hansen T.L., Gleisner H., Mann I., Yumoto K. Statistical maps of geomagnetic perturbations as a function of the interplanetary magnetic field // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. V. 115. N 10. P. A10320. doi: 10.1029/2010JA015540
8. Weimer D.R. An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations // Space Weather. 2013. V. 11. N 3. P. 107–120. doi: 10.1002/swe.20030
9. MacHol J.L., Green J.C., Redmon R.J., Viereck R.A., Newell P.T. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // Space Weather. 2012. V. 10. N 3. P. S03005. doi: 10.1029/2011SW000746
10. Newell P.T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E.J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. 2014. V. 12. N 6. P. 368–379. doi: 10.1002/2014SW001056
11. VorobeV A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., VorobeVa G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. N 6. P. ES6001. doi: 10.2205/2020ES000721
12. Nebiker S., Bleisch S., Gülch E. State of the art and critical issues Virtual Globes // GIM International. 2010. V. 24. N 7. P. 17–21.
13. Bajaj D., Bharti U., Goel A., Gupta S.C. PaaS providers and their offerings // International Journal of Scientific & Technology Research. 2020. V. 9. N 2. P. 4009–4015.
14. Kim J.R. A Study on the JSON Compatible Serialization Standard Method of LPG Data // The Journal of Next-Generation Convergence Technology Association. 2020. V. 4. N 6. P. 581–588.
15. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В., Крылова А.А., Шорохов С.А. Применение микросервисной архитектуры при проектировании промышленного оборудования с числовым программным управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 87–97. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-87-97

References

1. Starkov G.V. Planetary dynamics of auroral luminosity. *Physics of the near-Earth space*, Apatity, PGI, 2000, vol. 3, pp. 409–499. (in Russian)
2. Petrukovich A.A. Solar wind density effect on the night-side geomagnetic activity (AL index). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, vol. 68, no. 16, pp. 1843–1849. doi: 10.1016/j.jastp.2006.07.004
3. Lazutin L.L. Auroral oval as a beautiful but outdated paradigm. *Solar Terrestrial*, vol. 1, no. 1, pp. 23–35. (in Russian). doi: 10.12737/5673
4. LaLone N., Tapia A., MacDonald E., Case N., Hall M., Clayton J., Heavner M. Harnessing Twitter and crowdsourcing to augment aurora forecasting. *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW*, 2015, pp. 9–12. doi: 10.1145/2685553.2702671
5. He F., Wei Y., Wan W. Equatorial aurora: the aurora-like airglow in the negative magnetic anomaly. *National Science Review*, 2020, vol. 7, no. 10, pp. 1606–1615. doi: 10.1093/nsr/nwaa083
6. VorobeV V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G., VorobeVa G.R., Belov M.D. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters. *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 108–118. doi: 10.26583/sv.12.3.10
7. Weimer D.R., Clauer C.R., Engebretson M.J., Hansen T.L., Gleisner H., Mann I., Yumoto K. Statistical maps of geomagnetic perturbations as a function of the interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, vol. 115, no. 10, pp. A10320. doi: 10.1029/2010JA015540
8. Weimer D.R. An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations. *Space Weather*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 107–120. doi: 10.1002/swe.20030
9. MacHol J.L., Green J.C., Redmon R.J., Viereck R.A., Newell P.T. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae. *Space Weather*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. S03005. doi: 10.1029/2011SW000746
10. Newell P.T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E.J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 368–379. doi: 10.1002/2014SW001056
11. VorobeV A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., VorobeVa G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. ES6001. doi: 10.2205/2020ES000721
12. Nebiker S., Bleisch S., Gülch E. State of the art and critical issues Virtual Globes. *GIM International*, 2010, vol. 24, no. 7, pp. 17–21.
13. Bajaj D., Bharti U., Goel A., Gupta S.C. PaaS Providers and Their Offerings. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 4009–4015.
14. Kim J.R. A Study on the JSON Compatible Serialization Standard Method of LPG Data. *The Journal of Next-Generation Convergence Technology Association*, 2020, vol. 4, no. 6, pp. 581–588.
15. Afanasiev M.Y., Fedosov Yu.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. Microservice architecture application in the design of industrial equipment with computer numerical control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 87–97. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-87-97

Авторы

Воробьев Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008, Российская Федерация; научный сотрудник, Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация, [sc 56767909700](https://orcid.org/0000-0002-9680-5609), <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>, geomagnet@list.ru

Воробьева Гульнара Равилевна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008, Российская Федерация, [sc 57189275619](https://orcid.org/0000-0001-7878-9724), <https://orcid.org/0000-0001-7878-9724>, gulnara.vorobeva@gmail.com

Христовуло Ольга Игоревна — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008, Российская Федерация, [sc 57193714071](https://orcid.org/0000-0002-3987-6582), <https://orcid.org/0000-0002-3987-6582>, o-hristodulo@mail.ru

Authors

Andrei V. Vorobev — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation; Scientific Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296, Russian Federation, [sc 56767909700](https://orcid.org/0000-0002-9680-5609), <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>, geomagnet@list.ru

Gulnara R. Vorobeva — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation, [sc 57189275619](https://orcid.org/0000-0001-7878-9724), <https://orcid.org/0000-0001-7878-9724>, gulnara.vorobeva@gmail.com

Olga I. Khristodulo — D.Sc., Associate Professor, Head of Chair, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation, [sc 57193714071](https://orcid.org/0000-0002-3987-6582), <https://orcid.org/0000-0002-3987-6582>, o-hristodulo@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2021
Одобрена после рецензирования 11.02.2021
Принята к печати 13.03.2021

Received 29.01.2021
Approved after reviewing 11.02.2021
Accepted 13.03.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»