

Интерактивная геоинформационная система динамической визуализации характеристик аврорального овала на основе паттернов компонентно-ориентированного программирования

А.В. Воробьев^{1,А,В}, Г.Р. Воробьева^{2,В}

^А ФГБУН Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

^В ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

² ORCID: 0000-0001-7878-9724, gulnara.vorobeveva@gmail.com

Аннотация

Практическая потребность оперативного мониторинга динамики положения аврорального овала обусловлена наблюдаемыми в этом пространственном регионе негативными техносферными проявлениями эффектов космической погоды. Однако, известные программные средства моделирования аврорального овала решают указанную задачу недостаточно эффективно с точки зрения информативности и эргономики. В работе предложен подход к динамической визуализации характеристик аврорального овала, на программном уровне доступный в виде традиционного веб-приложения с возможностью рендеринга визуальных элементов в браузере, а также в формате автономного сервиса по типу RESTful-API. Разработанное решение обеспечивает визуализацию следующих параметров: вероятность наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, электрический и магнитный потенциалы поля в области северного аврорального пояса, а также различные типы авроральных высыпаний. Предполагается, что предложенный подход позволит существенно повысить эффективность работы по исследованию параметров в области аврорального овала специалистами и учеными соответствующих областей. При этом высокая внутренняя и низкая внешняя связности разработанных программных модулей позволяют встраивать их в сторонние приложения различного профиля и назначения.

Ключевые слова: полярные сияния, авроральный овал, геоинформационные системы, компонентно-ориентированный подход, API, веб-приложение.

1. Введение

Наглядным подтверждением вторжения в атмосферу потоков заряженных частиц и прямым доказательством существования солнечно-земных связей являются полярные сияния. Их всесторонние исследования в настоящее время определяются настоятельными потребностями практики.

Известно, что полярные сияния визуально проявляются в ночные часы преимущественно в северной и южной полярных шапках, а в некоторых случаях – к экватору от зон полярных сияний. Согласно известным стандартам (например, ГОСТ 25645.109 84 [1]), наиболее часто полярные сияния наблюдаются в районе аврорального овала – области ионосферы, являющейся проекцией плазменного слоя и каспа вдоль силовых линий геомагнитного поля. При этом важно различать так называемые мгновенный и усредненный авроральные овалы, первый из которых характеризует реально наблюдаемое над поверхностью Земли кольцо, а второй – некоторую овальную фигуру, размер

и форма которой определяются конфигурацией магнитосферы и параметрами солнечного ветра [2].

Исследования свидетельствуют, что в магнитоспокойные периоды диаметр аврорального овала составляет ~ 3000 км, при этом на дневной и ночной стороне граница авроральной зоны отстоит от магнитного полюса на $10-16^\circ$ и $20-23^\circ$ соответственно. В периоды солнечной активности авроральный овал расширяется и полярные сияния могут наблюдаться на $20-25^\circ$ южнее или севернее (для северной или южной полусферы соответственно) границ их обычного проявления.

Область аврорального овала, как правило, характеризуется наиболее активными проявлениями космической погоды, к которым относятся, в частности, вызванная геоиндуцированными токами перегрузка энергетических линий, сбой систем коротковолновой радиосвязи, и пр. [3]. Кроме того, для авроральных широт характерно наличие резких градиентов и высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует сбой и снижает устойчивость сигналов систем радиосвязи и навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [4].

В этой связи очевидна значимость мониторинга динамики положения аврорального овала для оценки сопутствующих явлений. При этом с точки зрения возможностей прогнозирования положения аврорального овала оценка соответствующей вероятности может быть проведена с конечной точностью в пространстве и во времени. Сама возможность прогноза обусловлена конечным сдвигом по времени (~ 1 часа) за счет распространения солнечного ветра от межпланетного спутника к границе магнитосферы, информация о котором является основой для моделирования положения аврорального овала.

Основным источником информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния. Результаты таких измерений не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, а также более чувствительны по сравнению с наземными и спутниковыми оптическими наблюдениями. Так, в частности, широкое распространение получила модель аврорального овала OVATION-prime (OP), основанная на данных более 20 лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) [5].

Автоматизированный мониторинг положения аврорального овала на основе известных эмпирических моделей реализуется рядом существующих на сегодняшний день информационных систем, представляющих собой преимущественно веб-ориентированные сервисы. Так, к примеру, широкое распространение получил веб-сервис NOAA (<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>) [5], в основе которого находится модель OVATION-prime, используется Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США [5] для краткосрочного прогнозирования интенсивности полярных сияний и обеспечивает визуализацию вероятности свечения атмосферы в области аврорального овала (Рисунок 1, а). Предоставляемые сервисом результаты визуализации активно используются как научными организациями в процессе проведения различного рода исследований, так и туристическими агентствами для привлечения туристов в высокоширотные регионы планеты для наблюдения полярных сияний.

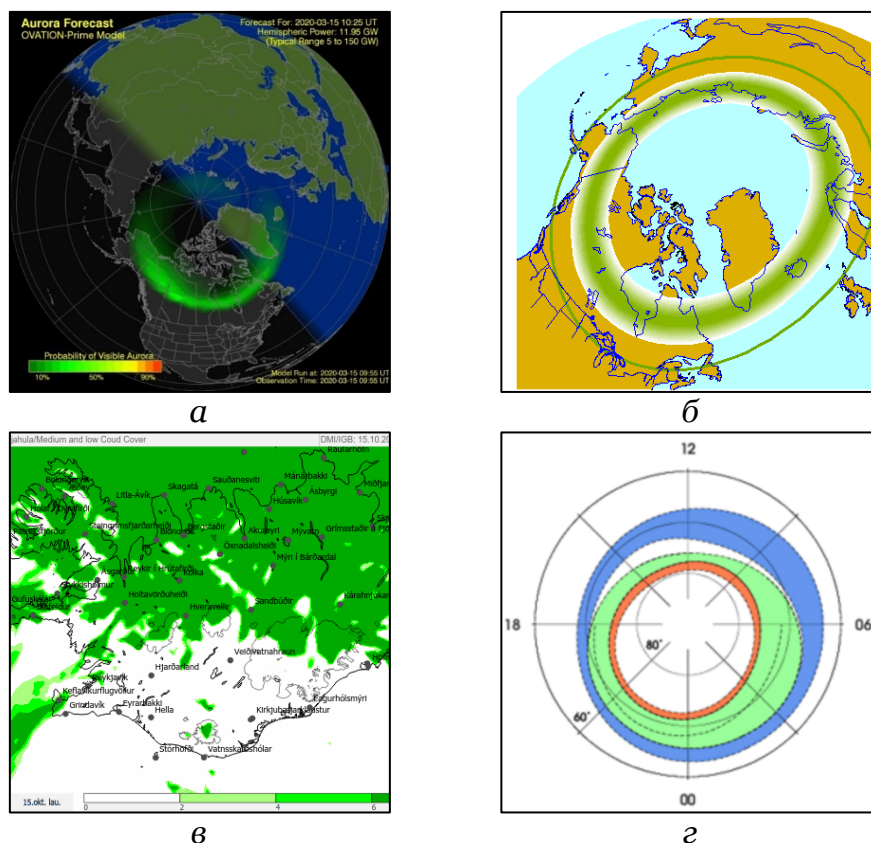


Рисунок 1 – Примеры результатов визуализации моделей аврорального овала

Помимо вышеупомянутого сервиса NOAA известны и другие программные продукты, которые ориентированы преимущественно на региональный мониторинг фрагментов аврорального овала. Ярким примером таких веб-приложений являются продукты, разработанные Аляскинским университетом (Фэрбенкс, США) (<https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast>) (Рисунок 1, б), а также метеорологической службой Исландии (<https://en.vedur.is/weather/forecasts/aurora/>) (Рисунок 1, в).

Еще один российский программный продукт построен на основе модели авроральных высыпаний (APM – Auroral Precipitation Model) [6, 7] и доступен по URL: <http://apm.pgia.ru/>. Модель построена на базе данных о геомагнитной активности, представленных значениями Dst и AL-индекса, и позволяет получить глобальное распределение характеристик высыпающих электронов в координатах «исправленная геомагнитная широта – местное геомагнитное время» (Рисунок 1, г). Здесь важно пояснить, что Dst-индекс представляет собой отклонение вариации магнитного поля от спокойного уровня, усредненное по значениям, измеренным на контрольной цепочке расположенных в низких широтах магнитных станций, а AL-индекс соответствует максимальному отрицательному отклонению H составляющей магнитного поля от среднего спокойного уровня на станциях авроральной зоны. С точки зрения программной реализации, указанный сервис не позволяет построить указанную модель для реальных текущих значений Dst и AL-индексов (предполагается их задание вручную), а также характеризуется отсутствием интерактивности изображения, картографических подложек и поддержкой геоинформационного инструментария, что в совокупности снижает эффективность применения инструмента.

Кроме того, известна разработанная в рамках норвежско-российского проекта модель NORUSCA прогноза характеристик аврорального овала по данным виртуального 15-минутного Кр-индекса (WING), который, в свою очередь, определяется на основании зависимости Кр-индекса от параметров солнечного ветра [8, 9]. Здесь также важно пояснить, что Кр-индекс – это планетарный индекс, характеризующий глобальную

возмущенность магнитного поля Земли в трехчасовом интервале времени. Модель позволяет построить овал сияний заблаговременно от 1 до 2 часов в зависимости от скорости движения заряженных частиц от Солнца. Соответствующие результаты доступны по адресу <http://kho.unis.no>. Приложение является однопользовательским и доступно только в формате десктопного или мобильного варианта.

Обобщая опыт работы с перечисленными выше и иными подобными программными продуктами, можно выделить ряд их характерных недостатков. К ним относятся, в частности, невозможность динамической визуализации и масштабирования, отсутствие наглядной информации о текущем состоянии космической погоды, а также геоинформационных инструментов для манипулирования параметрами анализа и графической интерпретации пространственных данных.

В этой связи является актуальной разработка интерактивной геоинформационной системы, обеспечивающей динамическую визуализацию параметров аврорального овала с возможностью их пользовательского анализа геоинформационными методами и инструментами на основе реальных значений параметров космической погоды. Ожидается, что решение обозначенной научно-технической задачи позволит разработать инструментарий для лучшего понимания исследователями и заинтересованными лицами физики различного рода процессов в авроральных и прилежащих к ним зонах.

Накопленный авторами опыт в области разработки программного обеспечения [10, 11] позволил сделать вывод, что основой решения поставленной задачи должно стать применение геоинформационных и веб-ориентированных технологий, что позволит расширить круг пользователей приложения, с одной стороны, а также существенно снизит требования к клиентским вычислительным мощностям, с другой.

2. Характеристика входных данных

Обсуждаемый в работе проект направлен на визуализацию в области аврорального овала следующих параметров: вероятность наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, электрический и магнитный потенциалы поля в области северного аврорального пояса, а также различные типы авроральных высыпаний. Вычислительные модели, формирующие соответствующие наборы пространственных данных, реализованы в виде исполняемых программных сценариев, размещенных на серверной стороне веб-ориентированного приложения.

Исходными данными являются результаты спутниковых наблюдений, доступные по стандартным сетевым протоколам передачи данных и предоставляемые провайдерами в соответствии с заданной временной меткой в виде совокупности атрибутивной и пространственной информации. Предоставляемые сервисами данные оформлены в текстовые потоки данных CSV-подобного и / или JSON-формата [12], что позволяет эффективно обрабатывать их в соответствующих серверных сценариях.

Так, к примеру, один из визуализируемых параметров – вероятность наблюдения полярных сияний невооруженным глазом – определяется в соответствии с прогностической моделью OVATION-prime, реализующей краткосрочный (30 мин) прогноз полярных сияний на основании параметров космической погоды и солнечного ветра. При этом значение задержки в 30 мин соответствует скорости солнечного ветра ~800 км/с, однако, действительности время задержки варьируется от менее чем 30 минут до часа или более, в зависимости от среднего значения скорости солнечного ветра.

Непосредственно модель реализована на уровне выполняемых на серверной стороне программных сценариев и в качестве результата возвращает текстовый набор данных в формате GeoJSON [12]. Каждый геопространственный примитив (пространственная точка) в соответствующем серверном отклике представляет собой совокупность трех компонентов – географических широты и долготы (пространственные данные) и значение вероятности наблюдения полярного сияния в соответствующей точке простран-

ства. Данные передаются по защищенному протоколу HTTPS через порт 443 в стандартном формате вида «запрос – отклик» [13].

Другой параметр – границы авроральных высыпаний – формируется по результатам работы серверного сценария, реализующего модель авроральных высыпаний APM [6, 7], которая, в свою очередь, получена по прямым наблюдениям характеристик высыпаящихся частиц со спутников серии DMSP. Входной информацией для сценария выступают значения индексов магнитной активности AL и Dst, которые могут быть получены с ресурса Мирового центра геомагнитных данных в Киото (WDC for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>)) [14]. Значительным недостатком указанного ресурса является отсутствие данных с 28 февраля 2018 г, что не позволяет построить планетарное распределение различных зон авроральных высыпаний в более поздние временные периоды. В исследовательском прототипе представленного авторами приложения предлагается использовать значения AL и Dst-индексов магнитной активности по прогностическим данным лаборатории атмосферной и космической физики (Laboratory for Atmospheric and Space Physics) Университета Колорадо (США), доступные по адресу: <https://lasp.colorado.edu/home/spaceweather/> [15].

Данные представлены в формате текстового CSV-файла, состоящего из двух полей: временной метки вида «ГГГГ/ДД-ЧЧ:ММ:СС» (ДД – порядковый номер дня в году) и непосредственно прогнозируемого значения соответствующего индекса магнитной активности. Ввиду ограниченной доступности обозначенного ресурса по веб-протоколам для сторонних приложений, в рассматриваемом проекте доступ к данным реализован посредством дополнительных программных экстракторов текстовой информации по соответствующим API.

Параметры электрического и магнитного потенциала в авроральной зоне рассчитываются на основании модели Веймера [16, 17], которая также программно реализована в виде модуля серверного сценария, иницируемого на выполнение запросом с клиентской стороны соответствующего приложения. В качестве входных данных для указанного программного сценария выступают параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, регистрируемые спутником DSCVR (<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/index.html>). Важно отметить, что в соответствии с моделью Веймера сферические гармонические функции могут быть использованы для определения значений потенциалов только в узкой области высоких широт. На более низких широтах потенциалы рассчитываются по нескольким функциям долготы ряда Фурье с дискретным шагом по широте [18]. Соответствующие данные представлены в независимом от самого программного сценария файле, обращение к которому выполняется по тому же защищенному сетевому протоколу HTTPS через порт 443.

3. Отображение результатов моделирования

В общем виде результаты моделирования параметров в области аврорального овала представляют собой наборы пространственных данных с соответствующими атрибутивными значениями. Визуализация и обработка таких данных традиционно выполняется посредством геоинформационных систем и технологий, обеспечивающих возможность применения широкого спектра средств, моделей и методов геоинформатики.

Основой геопространственного изображения является базовый геопространственный объект с соответствующей картографической подложкой. В качестве такого объекта выступают, как правило, плоские двумерные карты или виртуальные трехмерные глобусы. Поскольку в настоящем проекте основной акцент сделан на область аврорального овала, представляется целесообразным применять трехмерную геопространственную визуализацию. Такой выбор обусловлен тем, что виртуальные глобусы, использующие картографическую проекцию Меркатора (WGS 84), обладают наилучшими тех-

ническими характеристиками для визуализации пространственных данных в верхних и нижних широтах по сравнению с плоскими картами, где подобная визуализация в большинстве случаев сопровождается графическими артефактами [19].

Непосредственно визуализируемые данные на виртуальном глобусе должны быть представлены совокупностью геопространственных графических примитивов, к которым в большинстве случаев относятся пространственные точка, ломаная линия (полилиния) и полигон. Ввиду специфики анализируемых данных в области аврорального овала в рассматриваемом проекте визуализация реализована посредством геопространственных ломаных линий и полигонов. При этом каждому варианту геопространственной интерпретации соответствует собственная цветовая схема, позволяющая повысить эффективность визуального восприятия отображаемой информации конечным пользователем.

Выбор типа геопространственного примитива для визуализации определяется спецификой интерпретируемых данных [20]. Так, к примеру, для визуализации вероятности наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, а также электрического и магнитного потенциала поля в области северного аврорального пояса в рассматриваемом проекте используется комплекс ломаных линий. При этом полилинии представляют собой линии уровня, которые формируются из исходных пространственных данных, представленных пространственными точками с соответствующими атрибутивными значениями. Для генерации линий уровня (изолиний) на серверной стороне приложения предусмотрен отдельный программный модуль, принимающий на вход совокупность пространственных точек и значений в них, а возвращающий в результате набор изолиний. Указанный сценарий реализует соответствующие алгоритмы пространственной интерполяции для нерегулярных сетей мониторинга, а также выполняет непосредственно процедуру формирования линий уровня по пространственным данным и фильтрации полученного результата.

Другим используемым в проекте геопространственным примитивом является пространственный полигон, который применяется для визуализации различных типов авроральных высыпаний. Результат выполнения серверного сценария, реализующего модель АРМ, представляет собой три пространственных полигона, каждый из которых соответствует зоне авроральных высыпаний (область жестких диффузных высыпаний, авроральный овал, область мягких диффузных высыпаний). Цветовая схема к сформированным пространственным полигонам применяется непосредственно на клиентской стороне приложения.

Формирование и визуализация наборов графических примитивов на клиентской стороне реализованы в динамическом режиме, позволяющем оценить изменение во времени и пространстве соответствующих параметров в области аврорального овала. Указанная опция предусматривает последовательную во времени (с заданным пользователем шагом дискретизации) смену пространственных слоев, характеризующихся соответствующей пространственной меткой. Отсутствие наложения слоев в процессе выполнения процедуры визуализации создает для конечного пользователя эффект анимированного переключения геопространственных изображений, а возможность остановки процедуры позволяет более детально изучить данные за соответствующий временной интервал.

Доступные в приложении параметры настройки позволяют переключать цветовую схему визуализируемых посредством геопространственных примитивов данных в области аврорального овала. Для информативности геопространственного изображения предусмотрена визуализация терминатора, привязанного к соответствующей временной метке. При этом при необходимости для повышения читабельности геопространственного изображения терминатор возможно отключить.

В соответствии с концепцией Веб 2.0 [21], управление отображением геопространственных слоев в области аврорального овала реализовано в асинхронном режиме, что отражено в соответствующем формате взаимодействия с сервером: дерево объектной

модели веб-страницы с виртуальным глобусом меняется не полностью, а лишь частично, затрагивая скрываемый слой и не перезагружая геопространственный базовый объект с картографической подложкой.

Для упрощения пользовательской навигации в режиме визуализации анализируемых параметров в приложении предусмотрены механизмы, реализующие геоинформационные методы прямого и обратного геокодирования, что позволяет сместить фокус изображения в искомую пространственную точку. В дополнение при соответствующих настройках пользовательских агентов возможна функция геолокации, позволяющая переместить фокус непосредственно в географическую позицию пользовательского устройства.

4. Архитектура приложения

Веб-ориентированный каркас рассматриваемого приложения обеспечивает его массовое распространение и доступность широкому кругу конечных пользователей с минимальной квалификацией в области информационных технологий. Вместе с тем это накладывает ряд серьезных ограничений на технологии программной реализации функций обработки, анализа и визуализации соответствующей геопространственной информации. Данный факт соответствующим образом отражен в архитектуре представленного веб-приложения.

Традиционный подход к проектированию веб-приложений основан на применении трехуровневой клиент-серверной архитектуры, в которой в качестве компонента-медиатора применяется веб-сервер, управляющий соответственно взаимодействием между клиентской и серверной составляющими. При этом паттерн клиент-серверной архитектуры успешно реализует концепцию отделения данных от их представления, предусматривая возможность перераспределения вычислительно сложных функций между несколькими серверными узлами с возможностью последующего вертикального и / или горизонтального масштабирования для повышения реактивности итоговых приложений [22].

При этом известно, что в веб-приложениях повышение реактивности, тестируемости, гибкости и расширяемости осуществимо только посредством ослабления взаимосвязей между программными модулями как на клиентской, так и на серверной стороне. Последовательная иерархическая декомпозиция является основой распространяемого на сегодняшний день компонентно-ориентированного подхода, обеспечивающего возможность повторного использования автономных (или слабо связанных) программных компонент, в том числе и сторонними приложениями [23].

Отличительной особенностью компонентного подхода к разработке приложений является разработка и функционирование автономных друг относительно друга программных компонент в составе заданного окружения. При этом под окружением понимается вычислительная среда, в которой функционирует веб-приложение: платформы, фреймворки, интерпретаторы и компиляторы кода и пр. Однако сама архитектура проектируется таким образом, чтобы ее компоненты не зависели друг от друга и были легко заменяемы при рефакторинге и / или масштабировании приложения.

Каждому компоненту приложения присущи характерные свойства, важнейшим из которых является интроспективность, что предполагает наличие у каждого компонента метаданных, необходимых и достаточных для его применения в составе приложения при взаимодействии с другими программными модулями. Как правило, в качестве метаданных выступает интерфейс компонента, регламентирующий набор входных параметров, а также комплекс выходных данных как в контексте используемого при этом домена, так и синтаксических особенностей.

Для реализации необходимой функциональности в рассматриваемом приложении выделены компоненты, обеспечивающие формирование набора пространственных данных, с одной стороны, а также компоненты, реализующие их картографическую ин-

терпретацию, с другой. При этом в соответствии с принципами модульной декомпозиции веб-приложений, группы компонентов реализуют соответственно клиентскую и серверную составляющие, а также объекты, обеспечивающие взаимодействие с внешними источниками данных.

Обработка и графическая интерпретация геопространственных данных, как правило, сопряжена с вычислительно затратными процедурами. В соответствии с широко практикуемым в современных веб-приложениях плагиным подходом целесообразно выделить группу серверных компонент, отвечающих за подготовку и обработку пространственных данных. При этом производительность и реактивность серверных программных компонент напрямую определяется степенью их внешней и внутренней связности.

Известно, что оптимизировать функционирование веб-приложения возможно, если, к примеру, реализовать принцип открытости / закрытости: «Программные сущности (классы, модули, функции и т.п.) должны быть открытыми для расширения, но закрытыми для модификации». Это призвано обеспечивать гибкость и расширяемость программной системы, что, с одной стороны, предполагает возможность быстрого внесения изменений в программу, а также способность добавлять в систему новые сущности и функции, не нарушая ее основной структуры. При этом указанная архитектура также обеспечивает возможность повторного использования программных модулей в сторонних системах.

При декомпозиции программной системы необходимо стремиться к минимальной зависимости модулей друг от друга, с одной стороны, и максимальной зависимости внутренних компонент модуля (принцип High Cohesion + Low Coupling) [24]. При этом высокая сопряженность компонент внутри модуля проявляется в том, что модуль сфокусирован на решении одной узкой проблемы и не предполагает выполнение разнородных функций.

Существует и активно практикуется в современной разработке широкий спектр компонентно-ориентированных архитектурных подходов, которые преимущественно нашли отражение в применении специализированных шаблонов проектирования (паттернов) веб-приложений. Наибольшее распространение среди паттернов, обеспечивающих сильную внутреннюю и слабую внешнюю связность программных компонент, получили архитектурные шаблоны «Наблюдатель» («Observer») и «Посредник» («Mediator») [25].

Так, шаблон «Наблюдатель» предполагает наличие в архитектуре приложения дополнительного управляющего программного модуля, условно обозначаемого как «модуль-наблюдатель». Роль модуля-наблюдателя в приложении сводится к формированию обобщенного сообщения, поступающего от внутренних или сторонних компонент архитектуры, и предназначенного для соответствующих локальных программных модулей. Взаимодействие между программными модулями реализуется по принципу «отправитель – подписчик», в соответствии с которым основной модуль является отправителем сообщений, а все остальные модули – его подписчиками. В метаданных сообщения указываются идентификационные параметры искомого модуля-адресата (как правило, в качестве такового выступает URI). В фоновом режиме модули отслеживают появление новых сообщений и в случае совпадения метаданных с собственным идентификатором принимают соответствующий пакет.

Еще один шаблон – «Посредник» – также предполагает наличие дополнительного управляющего модуля (так называемого медиатора). Однако в отличие от предыдущего подхода формируемые при взаимодействии сообщения не являются общедоступными и направляются медиатором непосредственно в модуль-адресат, тем самым избавляя все остальные программные компоненты от необходимости непрерывно отслеживать все изменения во входящих информационных потоках.

Оба архитектурных паттерна предполагают наличие дополнительного программного модуля (наблюдателя или посредника), управляющего информационным взаимо-

действием между остальными компонентами приложения. Ключевым преимуществом такого подхода является обеспечение максимальной независимости компонент приложения, что позволяет распространять и использовать их по принципу веб-API в соответствии со способом программного RESTful-взаимодействия (REpresentational State Transfer) [26].

Так, к примеру, формируемый на серверной стороне набор пространственных изолиний, характеризующих вероятность наблюдений полярных сияний в регулярной пространственной сетке, имеет характерный API-интерфейс. Такой способ взаимодействия позволяет варьировать соответствующую визуализацию данных различными (в том числе отличными от локального по отношению к виртуальному каталогу) программными сервисами и системами по стандартному защищенному протоколу HTTPS.

При этом каждый разработанный в рамках предложенного решения программный компонент инкапсулирует особенности заложенных в нем вычислительных процессов таким образом, что для его идентификации было достаточно комплекса соответствующих граничных параметров. Так, к примеру, формирование результирующего набора пространственных полигонов в соответствии с моделью АРМ возможно посредством программного компонента, граничными значениями которого выступают временная метка, значения Dst и AL-индекса, с одной стороны, и результирующие GeoJSON-данные, с другой.

С точки зрения веб-ориентированной архитектуры, предложенное решение представляет собой приложение, основой которого является паттерн «модель – представление – контроллер». Паттерн обеспечивает реализацию ключевого принципа разработки, заключающегося в отделении данных от представления. При этом между поступающими от сторонних источников данными и бизнес-логикой предусмотрена модель ORM (Object-Relational Mapping), предусматривающая однозначное отображение информации в модель на основании соответствующей схемы данных.

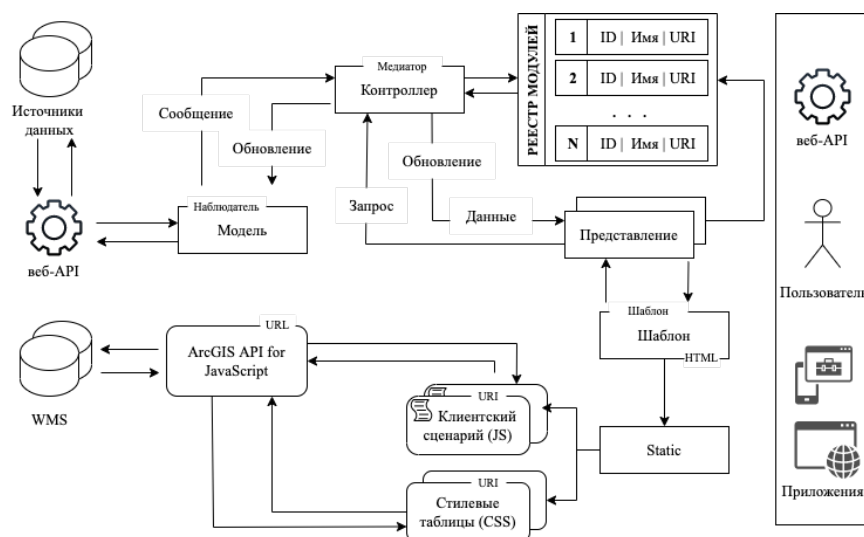


Рисунок 2 – Архитектура веб-ГИС

Управляющие воздействия в рамках предложенной схемы (Рис. 2) формируются со стороны модуля-контроллера и инициируются действиями пользователя или запросами сторонних / локальных программных модулей. При этом модель (по паттерну «Наблюдатель») находится в непрерывном взаимодействии с данными посредством периодических и триггерных сообщений, отклики на которые инициируют отправку соответствующих сообщений контроллеру.

Важно отметить, что в предложенной схеме контроллер выступает в роли медиатора, взаимодействующего с остальными программными модулями. При этом присутствующие в архитектуре программные компоненты со своими метаданными зарегистриро-

ваны в связанном с медиатором реестре модулей и предоставляют туда, в частности, необходимый для прямого доступа адрес URI.

Таким образом, в соответствии с предложенной архитектурой, веб-ориентированное приложение представляет собой совокупность программных компонентов со слабыми внешними связями и сильной внутренней связностью. Каждый компонент может использоваться автономно от остальных программных модулей, получая управление от внутренних или сторонних программных компонентов по предусмотренным входным параметрам.

Каждому из программных компонентов в предложенном решении поставлен в соответствие собственный уникальный идентификатор URI, являющийся одновременно параметром его абсолютной адресации. Указанный параметр обеспечивает поддержку метода GET для задания входных параметров, что позволяет обращаться к соответствующему программному компоненту по стандартному сетевому протоколу.

В общем случае имеет место RESTful-интерпретация каждого программного модуля, предполагающая его веб-API-архитектуру. При этом доступ к модулю реализуется (и инкапсулируется) посредством стандартного программного интерфейса, дескрипторы которого в качестве метаданных компонента должны быть переданы в заголовке соответствующего сообщения.

5. Программная реализация решения

Для качественной и количественной оценки эффективности, а также апробации предложенного решения был разработан исследовательский прототип веб-ориентированной геоинформационной системы, обеспечивающей визуализацию и гео-статистический анализ геофизических параметров в области аврорального овала. Представленный прототип находится в открытом доступе и доступен по URL <https://aurora-forecast.ru> по стандартному защищенному протоколу HTTPS посредством установленного на пользовательском компьютере веб-браузера.

Стек используемых программных технологий представлен фреймворком Django, обеспечивающим применение языка программирования Python для разработки серверных сценариев, с одной стороны, и кодирование клиентского компонента приложения на основе традиционной связки HTML5 / CSS3 / JavaScript, с другой. Фреймворк по умолчанию реализует архитектурный паттерн «модель – представление – контроллер» (Model-View-Controller, MVC), обеспечивая тем самым реализацию принципа отделения данных от их представления.

В дополнение к MVC-шаблону проектирования в архитектуру разработанного веб-ГИС был введен предложенный подход комбинирования паттернов «Наблюдатель» и «Посредник», что в результате позволило на программном уровне добиться автономности спроектированных программных модулей, обеспечивающих соответственно реализацию различных операций обработки, анализа и визуализации геопространственной информации. При этом обозначенные программные модули с учетом их реализации обеспечивают применение как RESTful-сервисов, что возможно благодаря наличию универсального доступа к ним посредством уникального URI.

Зарегистрированные в архитектуре программные модули представлены в компоненте `urls.py`, который в соответствии с принципами MVC-структуры проекта Django классифицируется как реестр модулей, которым оперирует непосредственно контроллер (в данном случае в роли медиатора / посредника). Выполняя роль посредника модуль-контроллер обеспечивает относительную независимость программных модулей друг от друга, передавая соответствующие информационные потоки согласно метаданным реестра модулей.

В дополнение к стандартной клиентской связке HTML/CSS/JavaScript, реализующей элементы пользовательского интерфейса для организации взаимодействия потребителя приложения с отрисованными пространственными данными, к разработанной веб-

ГИС подключен ряд сторонних программных библиотек. При этом ввиду относительной стабильности соответствующего контента с этой целью применяется технология CDN (content delivery network), расширяющая рассматриваемый проект на сторонние библиотеки в их первоисточнике. Такой подход, с одной стороны, характеризуется высокой производительностью без задействования собственных вычислительных мощностей, и обеспечивает непрерывную актуализацию программных механизмов, с другой.

Одним из важнейших сторонних компонентов разработанной веб-ГИС является программная библиотека ArcGIS, доступная по принципу организации веб-API и предоставляющая разработчику мощный инструмент геопространственного анализа и визуализации. Указанная библиотека предназначена для применения в JavaScript-сценариях на клиентской стороне и доступна по CDN-подключению.

6. Интерфейс решения

Разработанная веб-ГИС построена по принципу проектирования SPA-приложений (Single Page Application) и представляет собой динамическую веб-страницу, визуально разделенную на две функциональные области. Одна из них отвечает за отображение параметров солнечного ветра и космической погоды в виде интерактивных графиков, где по временной оси указываются значения временных меток в формате UTC, а по оси ординат представлены соответствующие значения анализируемых параметров.

Вторая составляющая разработанного интерфейса представляет собой непосредственно картографическое изображение геофизических параметров в области аврального овала. Центральным элементом этой составляющей является интерактивный виртуальный глобус с базовой картографической подложкой, подгружаемой с удаленного сервера WMS.

На виртуальном глобусе в формате динамически подгружаемых слоев осуществляется визуализация выделенных пользователем геофизических параметров. Каждому варианту динамического слоя соответствует собственная цветовая схема, описание которой приводится на той же визуальной панели в виде так называемой картографической легенды.

Для обеспечения интерактивной работы пользователя с приложением реализована поддержка ряда геоинформационных инструментов. К примеру, в разработанном приложении доступны функции прямого и обратного геокодирования, что позволяет конечному пользователю оперативно обратиться к геопространственной точке по полнотекстовому наименованию соответствующей геопозиции. Кроме того, веб-ГИС поддерживает инструменты быстрой геопространственной визуализации и отображает пользователю преобразованную в геодезические координаты (широту и долготу) позицию курсора на экране.

Параметры отображения пространственного слоя на виртуальном глобусе могут быть заданы пользователем посредством панели управления, где доступны опции переключения между слоями, а также управления цветовой схемой (монохромная или комплиментарная палитра), терминатором и пр. Во избежание блокировки приложения на время выполнения обращения к серверу за пространственными данными, все запросы реализованы в асинхронном режиме.

Еще одной важной функцией разработанного приложения является возможность ретроспективного прогноза соответствующих геофизических данных. Для этого в представленной веб-ГИС предусмотрен элемент управления, позволяющий выбрать искомую дату и время в формате UTC. Повторный геопространственный рендеринг позволяет пользователю визуально проанализировать пространственное распределение данных с учетом заданной временной метки.

Разработанное приложение обеспечивает пользователю возможность визуализации пространственного слоя в том числе и в ретроспективном режиме. Для этого необходимо выбрать искомые дату и время в формате UTC посредством представленного в

интерфейсе приложения визуального элемента. При этом непосредственно в самом элементе выбора даты на программном уровне деактивируются дни, для которых невозможно по тем или иным причинам сформировать набор пространственных данных.

Другой отличительной особенностью приложения является поддержка динамической визуализации пространственных слоев с анализируемыми параметрами. Для этого в интерфейсе предусмотрен элемент класса «TimeSlider», позволяющий пользователю в автоматическом и / или ручном режиме переключаться между слоями, соответствующими определенным временным меткам. При работе с приложением пользователь выбирает начальный и конечный моменты времени для проведения анализа, а также шаг дискретизации (на данном этапе может быть выбрано значение от 5 до 30 минут).

Разработанное приложение обеспечивает динамическую визуализацию пространственных слоев по двум параметрам – вероятности наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, а также электрического и магнитного потенциалов поля в области северного аврорального пояса. Актуальным для расчета временной динамики считается выбранный пользователем вариант визуализации (параметр сети мониторинга), который по умолчанию выступает в качестве базового для создания интегрированного слоя.

Необходимо отметить, что выполнение запроса на динамическую визуализацию предполагает отправку серии запросов сторонним источникам по установленному протоколу. Каждый полученный отклик приводит к формированию набора пространственных данных, соответствующего одному моменту времени. По завершению серии запросов к сторонним (или локальным, в зависимости от параметра) формируется единый интегрированный пространственный слой с соответствующими временными параметрами.

Переключение пространственных кадров посредством элемента управления класса «TimeSlider» ориентировано на работу со сформированным интегрированным пространственным слоем. Сопоставленный с указанным элементом управления программный сценарий реализует парсинг пространственных данных интегрированного слоя и разделяет его на кадры в соответствии с заданным временным интервалом. Доступные пользователю инструменты непрерывного или дискретного просмотра пространственных кадров обеспечивают возможность соответствующей динамической визуализации.

На программном уровне функция динамической визуализации напрямую связана с управлением видимостью пространственных слоев, что позволяет обеспечить плавный переход между кадрами визуализации, каждый из которых соответствует конкретной временной метке. Важно отметить, что при реализации указанной функции формируется единый интегрированный слой данных, при этом каждому графическому примитиву в нем ставится в соответствие собственное значение временного параметра. Характерная для данного подхода избыточность является вынужденной необходимостью и практически не сказывается на реактивности приложения в целом.

Компонентно-ориентированная архитектура разработанного приложения позволяет использовать его в двух вариантах. Во-первых, конечные пользователи могут обращаться к приложению через браузер и взаимодействовать с ним посредством формируемых в результате клиентского рендеринга элементов управления. При этом взаимодействие с сервером в асинхронном режиме позволяет обеспечить достаточно высокие эргономические характеристики приложения. С другой стороны, компонентно-ориентированный подход обеспечивает функциональную декомпозицию системы на отдельные автономные программные модули. Каждому из них в соответствии с принципами указанной архитектуры ставится собственный уникальный URL-адрес. Последний, в свою очередь, может быть использован сторонними программными системами и обеспечивает подключение в сторонние проекты (не только с веб-интерфейсом) соответствующих программных модулей.

При этом представляется целесообразным отметить, что в проекте на уровне каждого программного модуля (в данном случае речь идет преимущественно о серверной стороне архитектуры приложения) осознанно отключена поддержка CDN (Content Delivery Network – система доставки контента). Это позволяет избежать возможных коллизий, связанных с кэшированием соответствующих программных сервисов при схожих клиентских запросах к ним.

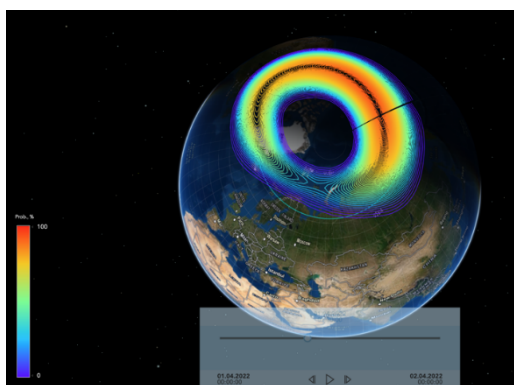
Каждый автономный программный модуль ориентирован на формирование определенного набора пространственных данных по заданным входным параметрам, в качестве которых преимущественно выступают значения даты и времени. Результат выполнения программного модуля представляет собой пространственный слой в формате GeoJSON, доступный как для визуализации известными геоинформационными системами и технологиями, так и для анализа посредством специализированных геостатистических библиотек.

7. Обсуждение результатов

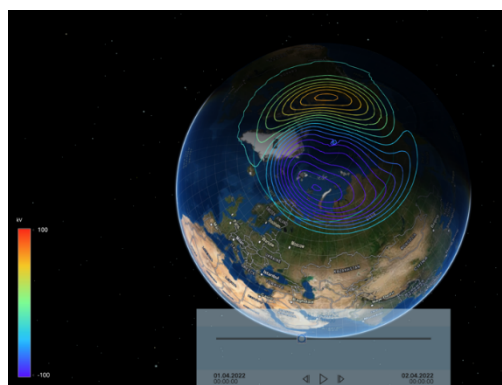
Разработанная в соответствии с предложенными решениями веб-ориентированная ГИС размещена и свободно доступна пользователям по адресу <https://aurora-forecast.ru>. Для работы с приложением пользователю необходимы браузер и стабильный выход в сеть Интернет.

Поддержка клиентского аппаратного ускорения веб-графики обеспечивает рендеринг высококачественного пространственного изображения с различными уровнями детализации. Главным пространственным объектом при этом выступает трехмерный виртуальный глобус с поддержкой интерактивности и возможностью масштабирования.

На рисунке 3 приведены экранные формы работы приложения на примере динамической визуализации тематических пространственных слоев. Так, на рисунке 3, а представлен вариант визуализации вероятности наблюдения полярных сияний в виде динамического слоя. Формирование слоя реализовано в соответствии с задаваемыми пользователем временными метками начала и окончания анализируемого периода. Результатом выполнения серверного запроса является декомпозируемый на кадры пространственный слой, каждый компонент которого соответствует определенной временной метке из заданного пользователем диапазона. Визуальный элемент в нижней части пользовательского экрана позволяет управлять отображением пространственных кадров в непрерывном или дискретном режиме.



а



б

Рисунок 3 – Экранные формы динамической визуализации пространственных слоев

Аналогичный пример приведен на Рисунке 3, б, где представлен вариант визуализации электрического и магнитного потенциала в авроральной зоне в северном полушарии. Рендеринг выполнен по аналогии с предыдущим примером и предусматривает

возможность визуального анализа динамического пространственного изображения при различных вариантах масштабирования и режимах покадрового воспроизведения.

Режим статической визуализации предполагает формирование геопространственного изображения в соответствии с заданной пользователем временной меткой. В зависимости от выбранного параметра для визуализации формируется соответствующий слой в виде пространственных изолиний. Управление сформированным геопространственным изображением реализуется посредством соответствующих инструментов, включающих в себя механизмы прямого и обратного геокодирования, геостатистического анализа, управления цветовой схемой и пр. (Рис. 4).

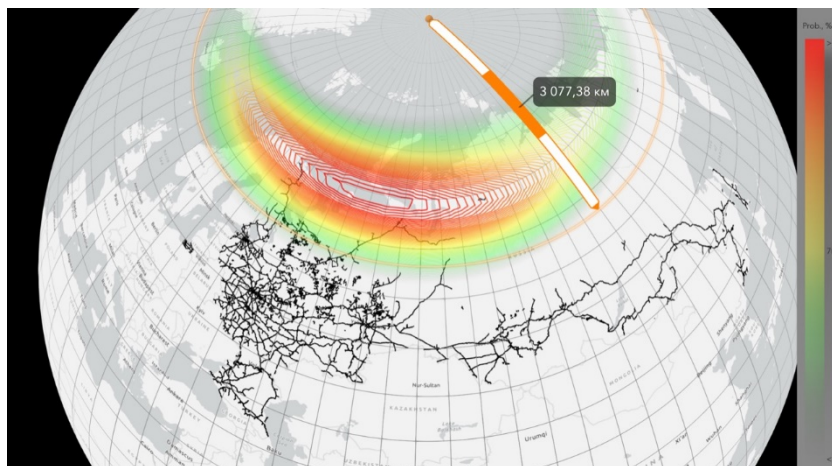


Рисунок 4 – Экранная форма статической визуализации пространственных слоев

Для оценки качества разработанной геоинформационной системы была проведена серия тестов, направленных как на выявления функциональных несоответствий в работе приложения, так и на анализ его поведения в различных ситуациях. Экспериментальные исследования проводились на клиентской стороне с применением ЭВМ (CPU Intel Core i5 10300H ГГц, оперативная память 4 ГБ, скорость интернет-соединения ~52.4 Мбит/с) и на серверной стороне – на базе веб-сервера с процессором 72 * Intel(R) Xeon(R) Gold 6140 CPU @ 2.30 ГГц.

Оценка производительности и отказоустойчивости приложения была выполнена посредством проведения нагрузочного тестирования. Результаты проведенных исследований показали, что максимальная производительность программной системы на представленной конфигурации составила 15 соединений (4 816 обработанных запросов) / час.

Оценка качества приложения с точки зрения соответствия фактической и ожидаемой функциональности была осуществлена согласно ГОСТ 28195-89. В соответствии с этой методикой были оценены показатели надежности, сопровождения, удобства применения, эффективности, универсальности и корректности программной системы. Тестирование было проведено в нормальных и экстремальных (рассматривались ситуации, связанные с отсутствием входных данных) условиях, а также исключительных ситуациях (низкоскоростное интернет-соединение, высокая нагрузка на сервер, ввод параметров запроса для сервера вручную). 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.

8. Заключение и выводы

Актуальность создания интерактивной информационной системы для визуализации геофизических параметров в авроральных широтах во многом определяется необходимостью мониторинга положения аврорального овала в процессе принятия решений в

прикладных областях. Именно для указанных областей характерны наиболее выраженные проявления космической погоды, губительные для систем и объектов техносферы (например, сбои в системах радиосвязи и навигационных спутниковых системах GPS/ГЛОНАСС).

Анализ известных программных продуктов показал их низкую эффективность ввиду невозможности масштабирования и динамической визуализации, отсутствия интерактивности и инструментов геоинформационного профиля. Усугубляет проблему и отсутствие на известных ресурсах агрегированных данных об актуальном состоянии космической погоды.

В этой связи предложена и разработана веб-ориентированная интерактивная геоинформационная система, обеспечивающая динамическую визуализацию параметров аврорального овала с возможностью их пользовательского анализа геоинформационными методами и инструментами на основе реальных значений параметров космической погоды.

С точки зрения программной реализации, отличительной особенностью предложенного решения является архитектура, основанная на компонентно-ориентированном подходе. Достигнутые при этом низкая внешняя и сильная внутренняя связности программных модулей обеспечивают возможность их применения в качестве самостоятельных сервисов (по принципу RESTful API), с одной стороны, и повышает расширяемость приложения в целом, с другой.

С точки зрения функциональности, разработанное приложение обеспечивает визуализацию следующих параметров в области аврорального овала: вероятность наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, электрический и магнитный потенциалы поля в области северного аврорального пояса, а также различные типы авроральных высыпаний. Визуализация пространственных слоев доступна в статическом и динамическом режимах, что позволяет как анализировать значения соответствующих параметров в заданный момент времени, так и оценивать их динамику в течение определенного временного интервала с установленным пользователем шагом дискретизации. Поддержка геоинформационных инструментов и возможность управления внешним видом пространственного изображения расширяют возможности пользователей при работе с приложением по сравнению с возможными аналогами. Еще одной отличительной особенностью является представление в приложении агрегированных данных по космической погоде в соответствующие моменты времени, что также повышает информативность результатов работы приложения в целом.

С точки зрения качества, результаты проведенного тестирования разработанного приложения показали, что оно корректно выполняет свои функции. В экстремальных и исключительных ситуациях программные сценарии выдают необходимые сообщения о соответствующей ошибке и продолжают работу в штатном режиме.

Благодарности

Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010.

Список литературы

1. ГОСТ 25645.109-84. Магнитосфера земли. Термины и определения. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984
2. Лазутин, Л. Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 1. С. 23-35. doi: 10.12737/5673
3. Kozyreva, O. V., V. A. Pilipenko, R. I. Krasnoperov, et al. Fine structure of sub-storm and geomagnetically induced currents // Annals of Geophysics. 2020. 63, No. 2, GM219.
4. Shagimuratov I., Chernouss S., Despirak I. [et al.] Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances // Sun and geosphere. 2018. No. 13. P. 89-94. doi:10.31401/SunGeo.2018.01.12.

5. Newell, P. T., K. Liou, Y. Zhang, et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*. 2014. No. 12. P. 368–379.
6. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зоны авроральных высыпаний // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. Т. 45. № 4. С. 438–444.
7. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика авроральных осадков во время сильных магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. № 2. С. 185–192.
8. Черноус С. А., Шагимуратов И. И., Филатов М. В. [и др.] Сравнение пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС и модельного аврорального овала // *Physics of Auroral Phenomena*. 2018. Т. 41, № 1. С. 160–163. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.160-163..
9. Chernous S. A., Filatov M. V., Shvets M. V. [et al.] Auroral perturbations as an indicator of ionosphere impact on navigation signals // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. No 3. P. 562–567. doi:10.1134/S1990793118030065.
10. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A. [et al.] System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations // *Scientific Visualization*. 2021. No. 13.1. P. 162–176. doi: 10.26583/sv.13.1.11
11. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I. [et al.] Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology // *Russ. J. Earth Sci.* 2020. No. 20. P. ES6001, doi:10.2205/2020ES000721.
12. Mooney P., Minghini M. Geospatial data exchange using binary data serialization approaches // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. Vol. XLVIII-4/W1-2022. P. 307–313. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W1-2022-307-2022.
13. Lasocha W., Badurowicz M. Comparison of WebSocket and HTTP protocol performance // *Journal of Computer Sciences Institute*. 2021. No. 19. P. 67–74. doi:10.35784/jcsi.2452.
14. Mandrikova O., Stepanenko A.A. Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations // *Computer Optics*. 2020. No. 44. P. 797–808. doi:10.18287/2412-6179-CO-709.
15. Luo B., Li X., Temerin M., Liu S. Prediction of the AU, AL, and AE indices using solar wind parameters // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2013. No. 118. doi:10.1002/2013JA019188
16. Weimer D. R., Clauer C. R., Engebretson M. J. [et al.] Statistical maps of geomagnetic perturbations as a function of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2010. No. 115. P.A10320, doi:10.1029/2010JA015540.
17. Weimer D. R. An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations // *Space Weather*. 2013. No. 11. P. 107–120, doi:10.1002/swe.20030
18. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G. [et al.] Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // *Scientific Visualization*. 2020. No. 12.3. P.108–118, doi: 10.26583/sv.12.3.10
19. Novikova E., Palamar A., Makhonko S. [et al.] Transformation parameters between UCS-2000 and WGS-84 // *Geodesy and cartography*. 2018. No. 44. P. 50–54. doi:10.3846/gac.2018.1830.
20. Yassine L., Lakhri Y., Ali S. Geospatial Big Data Platforms: A Comprehensive Review. KN // *Journal of Cartography and Geographic Information*. 2022. No. 16. doi: 10.1007/s42489-022-00121-7.
21. Baytar C. Dynamics of Web 2.0: A Software Application "Web 2.0 Meter" // *Gazi university journal of science*. 2022. doi: 10.35378/gujs.1053604.
22. Kumar S. A review on client-server based applications and research opportunity // *International Journal of Scientific Research*. 2019. No. 10. P. 33857–33862. doi:10.24327/ijrsr.2019.1007.3768.

23. Kaur A., Kaur P., Kaushal P. Maintainability Procedure in Component-Based Software // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2020. No. 17. P. 5156-5161. doi:10.1166/jctn.2020.9357.
24. Tyagi B., Beg Y. An Experimental Assessment on Effects of Solid Design Principles on the quality of Software using CKJM Metric Analysis // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. No. 10. doi:10.22214/ijraset.2022.46808.
25. Bagrudeen B.A., Yuvaraj Dr. D., Shithart M. [et al]. An efficient mechanism for deep web data extraction based on tree-structured web pattern matching // Wireless communications and mobile computing. 2022. P. 1-10. doi:10.1155/2022/6335201.
26. Padmanaban R., Thirumaran M., Anitha P. [et al.] Computability Evaluation of RESTful API using Primitive Recursive Function // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. 2018. No. 34. doi:10.1016/j.jksuci.2018.11.014.

Interactive Geoinformation System for Dynamic Visualization of Auroral Oval Characteristics Based on Component-Oriented Programming Patterns

A.V. Vorobev^{1,A,B}, G.R. Vorobeva^{2,A}

^A Geophysical Center of the RAS, Moscow, Russia

^B Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

² ORCID: 0000-0001-7878-9724, gulnara.vorobeva@gmail.com

Abstract

The practical need for operational monitoring of the position dynamics of the auroral oval is due to the negative technospheric manifestations of space weather effects observed in this spatial region. However, the well-known software tools for modeling the auroral oval solve this problem inefficiently from the point of view of informativeness and ergonomics. The paper proposes an approach to dynamic visualization of the characteristics of the auroral oval, which is available at the program level in the form of a traditional web application with the ability to render visual elements in the browser, as well as in the format of a standalone service like RESTful-API. The developed solution provides visualization of the following parameters: the probability of observing the glow of the upper layers of the atmosphere with the naked eye, the electric and magnetic potentials of the field in the region of the northern auroral belt, as well as various types of auroral precipitation. It is assumed that the proposed approach will make it possible to significantly increase the efficiency of the study of parameters in the auroral oval region by specialists and scientists in the relevant fields. At the same time, the high internal and low external connectivity of the developed software modules allow them to be integrated into third-party applications of various profiles and purposes.

Keywords: auroras, auroral oval, geoinformation systems, component-oriented approach, API, web application.

References

1. Standard GOST 25645.109-84. Earth's magnetosphere. Terms and Definitions. Moscow: USSR State Committee for Standards, 1984 (in Russian)
2. Lazutin, L. L. (2015) Aurora oval – a beautiful but outdated paradigm // *Solnechno-zemnaya physica*, v. 1, no. 1, p. 23-35, doi: 10.12737/5673
3. Kozyreva, O. V., V. A. Pilipenko, R. I. Krasnoperov [et al.] (2020) Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // *Annals of Geophysics*, 63, no. 2, GM219.
4. Shagimuratov I., Chernouss S., Despirak I. [et al.] (2018) Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances // *Sun and geosphere*, 2018, no. 13, p. 89-94. doi:10.31401/SunGeo.2018.01.12.
5. Newell, P. T., K. Liou, Y. Zhang, et al. (2014) OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*, no. 12, p. 368–379.
6. Vorobyov V.G., Yagodkina O.I. (2005) Influence of magnetic activity on the global distribution of the auroral precipitation zone // *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 45, no. 4, p. 438-444 (in Russian).
7. Vorobyov V.G., Yagodkina O.I. (2007) Dynamics of auroral precipitation during strong magnetic storms // *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 47, no. 2, p. 185-192 (in Russian).

8. Chernous S. A., Shagimuratov I. I., Filatov M. V. [et al.] (2018) Comparison of spatio-temporal distribution of TEC inhomogeneities and model auroral oval // *Physics of Auroral Phenomena*, vol. 41, no. 1, p. 160-163. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.160-163.
9. Chernous S. A., Filatov M. V., Shvets M. V. [et al.] (2018) Auroral perturbations as an indicator of ionosphere impact on navigation signals // *Russian Journal of Physical Chemistry*, vol. 12, no. 3, p. 562-567, doi:10.1134/S1990793118030065.
10. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A. [et al.] (2021) System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations // *Scientific Visualization*, no. 13.1, p. 162-176, doi: 10.26583/sv.13.1.11
11. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I. [et al.] (2020) Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology // *Russ. J. Earth Sci.*, 20, p. ES6001, doi:10.2205/2020ES000721.
12. Mooney P., Minghini M. (2022) Geospatial data exchange using binary data serialization approaches // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-4/W1-2022, p. 307-313, doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W1-2022-307-2022.
13. Lasocha W., Badurowicz M. (2021) Comparison of WebSocket and HTTP protocol performance // *Journal of Computer Sciences Institute*, no. 19, p. 67-74, doi:10.35784/jcsi.2452.
14. Mandrikova O., Stepanenko A.A. (2020) Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations // *Computer Optics*, 44, p. 797-808, doi:10.18287/2412-6179-CO-709.
15. Luo B., Li X., Temerin M., Liu S. (2013) Prediction of the AU, AL, and AE indices using solar wind parameters // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, no. 118, doi:10.1002/2013JA019188
16. Weimer D. R., Clauer C. R., Engebretson M. J. [et al.] (2010) Statistical maps of geomagnetic perturbations as a function of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.*, no. 115, p.A10320, doi:10.1029/2010JA015540.
17. Weimer D. R. (2013) An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations // *Space Weather*, 11, p. 107-120, doi:10.1002/swe.20030
18. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G. [et al.] (2020) Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // *Scientific Visualization*, no. 12.3, p.108-118, doi: 10.26583/sv.12.3.10
19. Novikova E., Palamar A., Makhonko S. [et al.] (2018) Transformation parameters between UCS-2000 and WGS-84 // *Geodesy and cartography*, no. 44, p. 50-54. doi:10.3846/gac.2018.1830.
20. Yassine L., Lakhri Y., Ali S. (2022) Geospatial Big Data Platforms: A Comprehensive Review. KN // *Journal of Cartography and Geographic Information*, no. 16, doi: 10.1007/s42489-022-00121-7.
21. Baytar C. (2022) Dynamics of Web 2.0: A Software Application "Web 2.0 Meter" // *Gazi university journal of science*, doi: 10.35378/gujs.1053604.
22. Kumar S. (2019) A review on client-server based applications and research opportunity // *International Journal of Scientific Research*, no. 10, p. 33857-33862, doi:10.24327/ijrsr.2019.1007.3768.
23. Kaur A., Kaur P., Kaushal P. (2020) Maintainability Procedure in Component-Based Software // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, no. 17, p. 5156-5161, doi:10.1166/jctn.2020.9357.
24. Tyagi B., Beg Y. (2022) An Experimental Assessment on Effects of Solid Design Principles on the quality of Software using CKJM Metric Analysis // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, no. 10, doi:10.22214/ijraset.2022.46808.
25. Bagrudeen B.A., Yuvaraj Dr. D., Shithart M. [et al] (2022). An efficient mechanism for deep web data extraction based on tree-structured web pattern matching // *Wireless communications and mobile computing*, p. 1-10, doi:10.1155/2022/6335201.

26. Padmanaban R., Thirumaran M., Anitha P. [et al.] Computability Evaluation of RESTful API using Primitive Recursive Function // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, no. 34, doi:10.1016/j.jksuci.2018.11.014.