

УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ**

Лабораторный практикум

**Уфа
РИЦ УУНиТ
2023**

*Печатается по решению кафедры геоинформационных систем УУНиТ
(протокол № 5 от 20.04.2023 г.)*

Рецензент:

д-р техн. наук, профессор **Г.Р. Воробьева**

Составитель:

д-р техн. наук, профессор **А.В. Воробьев**

Цель лабораторного практикума состоит в формировании компетенций, обеспечивающих понимание механизмов возникновения полярных сияний, а также освоении методов их компьютерного прогнозирования и диагностирования, что, по мнению руководителя проекта, может привлечь дополнительное внимание молодых ученых и исследователей к проблемам Арктического региона.

Предназначен для студентов направления 09.03.02 Информационные системы и технологии при изучении дисциплины «Моделирование природных и техногенных процессов».

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ЗАДАНЫМ ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ»	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ»	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 «ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА»	19

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшие риски, связанные с негативным влиянием космической погоды на показатели надежности объектов земной техносферы – перегрузки линий электропередач, отказы систем энергораспределения и автоматики железных дорог происходят на высоких широтах в области аврорального овала – пояса интенсивной светимости, создаваемой вторжением в атмосферу электронов из околоземного пространства. Проблемы с точностью и отказоустойчивостью также испытывают глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС. Так, именно в области аврорального овала, вследствие характерных для нее резких градиентов, высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы и электроджетов, регистрируются частые срывы фазы навигационного сигнала и экстремальные ошибки местоопределения. Вследствие этого, на GPS приемниках погрешность высокоточной навигации (режим PPP) может увеличиваться до 5 раз относительно фоновому уровню в области высыпания авроральных электронов в ионосферу. В периоды сильной геомагнитной активности авроральный овал спускается на более низкие широты, и область снижения качества навигационного сигнала распространяется на средние широты. Таким образом, оперативный прогноз положения аврорального овала и интенсивности полярных сияний способен повысить эффективность принимаемых решений при управлении энергетическими, инфокоммуникационными, транспортными и навигационными системами в высокоширотных регионах.

Наиболее надежными считаются модели аврорального овала, построенные на данных регистрации потоков частиц на низкоорбитальных спутниках. Эти данные не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, доступны для обоих полушарий и более чувствительны к высыпаниям частиц, чем наземные или спутниковые оптические наблюдения. Модель, предсказывающая планетарное распределение различных типов высыпаний авроральных частиц на основе статистического анализа данных низкоорбитальных спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), разработана в ПГИ. Однако эта модель параметризована на значения геомагнитных индексов AL и Dst, поэтому она не может быть использована в прогностических целях. Большое распространение получила модель OVATION-Prime (OP), основанная на данных 21 года (около 2 солнечных циклов) наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий спутниками DMSP. Эта модель параметризована по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), передающихся в режиме реального времени с межпланетных спутников, что обеспечивает возможность оперативного прогноза динамики аврорального овала.

В настоящее время учеными разработаны несколько математических моделей, позволяющих прогнозировать значение различных геофизических параметров в области аврорального овала (электрический и магнитный

потенциал, интегральная мощность возбуждения верхних слоев атмосферы и др.). В качестве входных данных в таких моделях обычно используются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, регистрируемые в режиме реального времени спутником ACE, а с 2016 г также и спутником DSCOVR (оба спутника находятся в точке Лагранжа L1 на линии Земля – Солнце).

Так, например, эмпирическая модель OVATION (от англ. Oval Variation, Assessment, Tracking, Intensity, and Online Nowcasting), разработанная Патриком Ньюэллом и его коллегами из лаборатории прикладной физики университета Джонса Хопкинса в США в 2009 г., предполагает линейную прямо пропорциональную зависимость между интенсивностью полярных сияний и вероятностью их наблюдения невооруженным глазом. В дальнейшем, по данным приборного комплекса UVI (Ultraviolet imager), установленного на спутнике NASA Polar, это положение нашло экспериментальное подтверждение.

Веб-сервис NOAA (<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>), в основе которого находится модель OVATION-Prime, используется Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США для краткосрочного прогнозирования интенсивности полярных сияний и обеспечивает визуализацию вероятности свечения атмосферы в области аврорального овала. На сегодняшний день данный сервис является, пожалуй, одним из самых известных и востребованных программных продуктов такого рода. Помимо метеорологических служб и профильных научно-исследовательских организаций результаты визуализации (ссылаясь непосредственно на ресурс NOAA, либо в виде отдельных приложений, копирующих данные изображения) активно используют туристические агентства всего мира, привлекая миллионы туристов в высокоширотные регионы планеты для наблюдения полярных сияний в наиболее благоприятные для этого периоды.

Опыт работы с названными выше и некоторыми другими аналогичными сервисами позволил выявить ряд характерных и, в принципе, повторяющихся от реализации к реализации недостатков, к которым, в первую очередь следует отнести: невозможность динамического масштабирования и добавления дополнительных слоев; малое число отображаемых параметров; отсутствие данных о текущем состоянии космической погоды и базовых инструментов для пространственного анализа визуализированных параметров.

Автором разработана и представлена веб-ориентированная информационная система «Aurora Forecast», доступная по адресу <https://aurora-forecast.ru>. В ее основе лежит интерактивная компьютерная модель краткосрочного (с горизонтом 30–70 мин) прогноза интенсивности полярных сияний в виде веб-ориентированной геоинформационной системы. В качестве базового математического обеспечения используется эмпирическая модель OVATION-Prime, устанавливающая статистические связи между параметрами

солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоками авроральных частиц. На базе этой модели построена система, моделирующая пространственное планетарное распределение вероятности наблюдения полярных сияний и ряда сопутствующих величин.

Визуализация данных осуществляется на базе технологии «виртуальный глобус» и предоставляется конечному пользователю посредством специализированного веб-сервиса. Верификация прогноза проведена путем сопоставления предсказаний модели с данными 16 камер, ведущих непрерывные наблюдения полярных сияний в видимом спектре. Доля совпадений предсказанных и наблюдаемых сияний составила 86 %. Разработанный сервис дает возможность как прогноза, так и анализа прошедших событий. Система обеспечивает возможность работы с пользовательскими слоями, т. е., например, сопоставить картину пространственного распределения вероятности полярных сияний с сетью железнодорожных транспортных систем для территории РФ.

Работа выполнена в рамках проекта АНО «Экспертный центр – Проектный Офис Развития Арктики (ПОРА)» (договор № 379-Г от 16 января 2023 г).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ЗАДАНЫМ ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Цель работы: изучить инструмент моделирования и визуализации аврорального овала как области наиболее вероятного наблюдения полярных сияний.

Задание: для заданных параметров даты и времени построить модели аврорального овала для северного и южного полушария, сравнить пространственные характеристики сформированных изображений.

1.1. Краткие теоретические сведения

Высокоширотные области северного и южного полушарий планеты с центром в магнитном полюсе Земли называются авроральными овалами. Их пространственные границы определяются возможностью наблюдения в их пределах полярных сияний, представляющих собой свечения верхних слоев атмосферы. Такое свечение является следствием воздействия проникающих в атмосферу потоков солнечных электронов и протонов.

Известно, что в спокойные периоды диаметр авроральных овалов составляет около 3000 км, при этом на дневной и ночной стороне границ авроральной зоны отстоит от магнитного полюса на $10\text{--}16^\circ$ и $20\text{--}23^\circ$ соответственно.

Поскольку магнитные полюса Земли отстоят от географических на $\sim 11.5^\circ$, полярные сияния чаще всего наблюдаются в диапазоне северных и южных широт $67\text{--}70^\circ$, однако во времена солнечной активности авроральный овал расширяется и полярные сияния могут наблюдаться на $20\text{--}25^\circ$ южнее или севернее (для северной или южной полусферы соответственно) границ их обычного проявления.

До недавнего времени считалось, что полярные сияния в северном и южном полушарии являются строго симметричными. Однако одновременное наблюдение полярного сияния из космоса со стороны северного и южного полюсов в октябре 2002 г. показало, что северное и южное сияния существенно отличаются друг от друга.

В качестве объектов визуализации в настоящей работе рассматриваются следующие параметры в области аврорального овала: вероятность наблюдения свечения верхних слоев атмосферы невооруженным глазом, электрический и магнитный потенциалы поля в области северного аврорального пояса, а также геометрические центры северного и южного авроральных поясов, определяемые координатами южного и северного магнитных полюсов, в соответствии с выражениями (1). Так, например, координаты северного

магнитного полюса, а следовательно, и центра южного аврорального овала по состоянию на 1 января 2020 г. составят 80.59° ю.ш., 72.68° з.д.:

$$\tan(X_0) = \frac{g_1^0}{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}; \tan(Y_0) = \frac{h_1^1}{g_1^1}, \quad (1)$$

где X_0 и Y_0 – географическая широта и долгота северного полюса геомагнитного диполя соответственно; h_j^i и g_j^i – сферические гармонические коэффициенты (IGRF-коэффициенты) для данной магнитной эпохи (https://www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/coeffs/igrf13_coeffs.txt).

Вероятность наблюдения свечения верхних слоев атмосферы невооруженным глазом, т. е. полярных сияний, подобно сервису NOAA определяется в соответствии с прогностической моделью OVATION-Prime, реализующей краткосрочный (30 мин) прогноз полярных сияний. Значение задержки в 30 минут соответствует скорости солнечного ветра ~ 800 км/с, однако в действительности время задержки варьируется от менее чем 30 минут до часа или более в зависимости от среднего значения скорости солнечного ветра.

Несмотря на отсутствие в настоящее время интерактивных веб-сервисов, обеспечивающих визуализацию геофизических параметров в авроральной зоне, было показано, что построение такого рода информационных систем, кроме прочего, укомплектованных даже базовыми методами геоинформационных систем (ГИС) не только возможно, но и предоставляет значимые преимущества перед известными на сегодняшний день подходами.

В силу геопространственной специфики распределения анализируемых данных по причине искажения геометрического подобия контуров, соотношения площадей земной поверхности и картографических искажений проекций традиционные плоские картографические подложки использовать нецелесообразно, и при реализации системы стоит делать выбор в пользу виртуальных глобусов. Исключение составляют плоские проекции северной и южной полусфер, однако помимо того, что такой вид карт не поддерживается большинством доступных программных библиотек, он также уступает трехмерной модели Земли по качеству визуального восприятия информации.

Автором на базе технологии «виртуальный глобус» предложен подход (архитектура и ее программная реализация) к созданию веб-ориентированной системы визуализации геофизических параметров в авроральной зоне (www.aurora-forecast.ru). В качестве визуализируемых данных выступает интенсивность (вероятность наблюдения невооруженным глазом) полярных сияний, получаемая в соответствии с моделью OVATION. Предполагается, что рассмотренный подход к визуализации геофизических параметров в области аврорального овала обеспечит повышение эффективности работ, связанных с исследованием динамики аврорального овала, и в конечном итоге поможет

выявить новые знания относительно топологии магнитосферы и ее изменениях, например, во время геомагнитных бурь и суббурь.

1.2. Порядок выполнения работы

1. Запустить веб-приложение «Aurora Forecast» (<https://aurora-forecast.ru/>) через любой доступный браузер (рекомендуется Google Chrome или Safari).

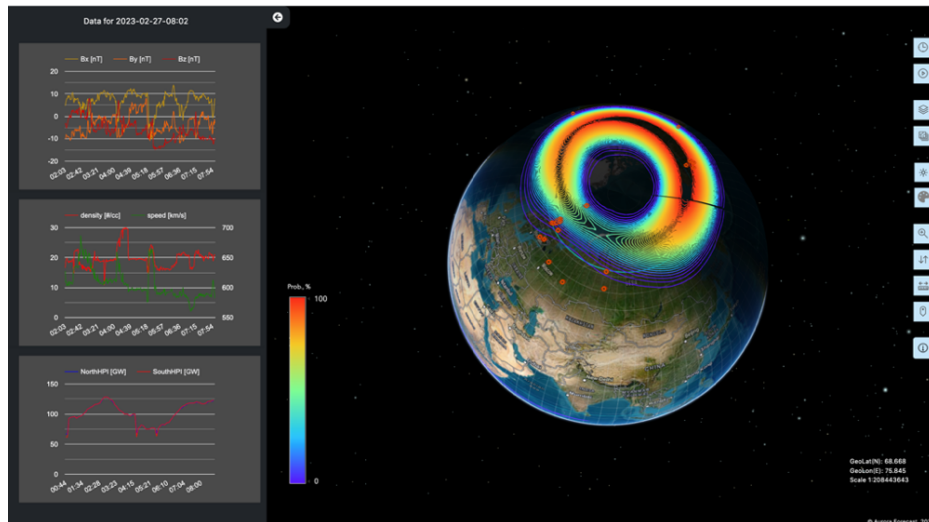



Рис. 1. Главная страница приложения «Aurora Forecast» (<https://aurora-forecast.ru/>)

По умолчанию доступны характеристики аврорального овала на текущий момент времени (UT).

2. С использованием элемента панели инструментов (в правой стороне главного окна, пиктограмма вида ) ввести дату и время из таблицы 1 (рис. 2).

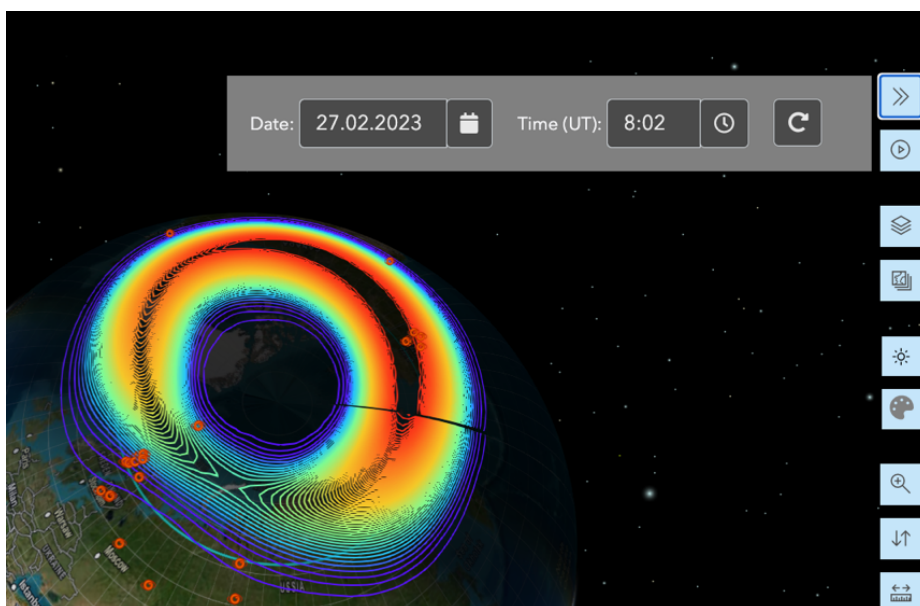




Рис. 2. Выбор даты и времени для моделирования и визуализации аврорального овала

Таблица 1

Данные для моделирования и визуализации

№	Дата	Время
1	2023-02-28	04:05
2	2023-02-27	18:55
3	2023-02-27	14:35
4	2023-02-26	20:35
5	2023-01-25	18:05
6	2022-12-07	20:05
7	2022-11-15	16:40
8	2022-10-10	08:00
9	2022-06-01	01:00
10	2022-03-02	03:00

Далее нажать на кнопку повторного рендеринга пространственного слоя (помечено пиктограммой ).

3. После рендеринга обновленного пространственного изображения оценить пространственные характеристики сформированного набора пространственных изолиний и аврорального овала. Для этого воспользоваться инструментом измерения расстояний с панели инструментов (пиктограмма ). Измерить расстояние так, как это показано на рисунке 3.

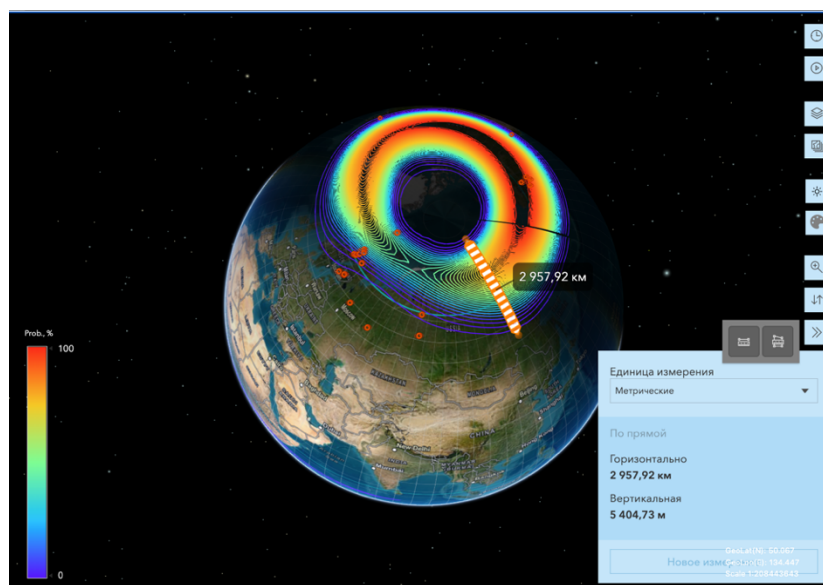


Рис. 3. Измерение радиуса аврорального овала

Записать полученное значение в таблицу результатов.

4. Аналогичным образом провести моделирование, визуализацию и анализ параметров аврорального овала для остальных значений даты и времени из таблицы 1.

5. Для любого значения даты и времени из таблицы 1 выполнить визуализацию всех доступных дополнительных слоев: железные дороги, магнитные обсерватории и камеры всего неба.

1.3. Содержание отчета

- Титул.
- Цель и задачи работы.
- Общие теоретические положения.
- Описание интерфейса приложения «Aurora Forecast».
- Таблица результатов экспериментов в формате:

№	Дата, время (UT)	Минимальное значение вероятности наблюдения полярного сияния	Максимальное значение вероятности наблюдения полярного сияния	Радиус аврорального овала

– Скриншот задания 5 с визуализацией дополнительных слоев и описанием взаимного расположения аврорального овала и техносферных объектов.

- Выводы по работе.

1.4. Контрольные вопросы

- Что такое авроральный овал?
- Результатом чего являются полярные сияния?
- Каков диаметр авроральных овалов в магнитоспокойные периоды?
- В каких широтах чаще всего наблюдаются полярные сияния?
- Охарактеризуйте приложение «Aurora Forecast».

1.5. Список литературы

1. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. М: 1983 Наука, 1983. 136 с.
2. Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. 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.
3. Воробьев А.В. Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, в. 6. – С. 963–972.

4. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Веб-ориентированная 2D/3D-визуализация параметров геомагнитного поля и его вариаций // Научная визуализация. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 94–101.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Цель работы: изучить инструмент моделирования и визуализации аврорального овала как области наиболее вероятного наблюдения полярных сияний.

Задание: для заданных параметров даты и времени построить модели аврорального овала для северного и южного полушария, сравнить пространственные характеристики сформированных изображений.

2.1. Краткие теоретические сведения

Для определения границ аврорального овала, а также аппроксимации геомагнитных возмущений, вызванных ионосферными холловскими токами, расчета потока вектора Пойтинга или Джоулева нагрева в ионосфере, необходим расчет параметров электрического и магнитного потенциала. В приложении «Aurora Forecast» электрический и магнитный потенциал в авроральной зоне рассчитывается согласно эмпирической модели Веймера. Модель была реализована в виде отдельного серверного сценария на языке Python 3 с перспективой ее применения для веб-ориентированной визуализации под фреймворк Django. В качестве входных параметров в данной модели, как и в предыдущем случае, используются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, регистрируемые спутником DSCOVR. Также отметим, что согласно данной модели, при определении значений потенциалов, сферические гармонические функции используются лишь в узкой области высоких широт. На более низких широтах потенциалы рассчитываются по нескольким функциям долготы ряда Фурье с дискретным шагом по широте. Эти данные представлены в виде отдельных файлов, физически разделенных с основным сценарием.

В основе предложенной системы визуализации лежит характерная для веб-приложений клиент-серверная архитектура, реализуемая посредством шаблона проектирования MVC (Model-View-Controller) и соответствующего ему компонентного разделения данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики. К преимуществам обозначенного подхода относятся структурированность программного кода, возможность его повторного использования и, как результат, снижение сложности веб-приложения.

В настоящее время указанный архитектурный паттерн поддерживается многими инструментами веб-разработки, однако в работе реализация предложенных решений выполнена на базе фреймворка Django, представляющего собой фреймворк со множеством встроенных

высокоуровневых возможностей (по типу «batteries included») и стандартизированной структурой разрабатываемых приложений.

Кроме этого, данный фреймворк включает в себя механизмы предотвращения распространенных атак типа XSS и CSRF, использует ORM и выдерживает высоконагруженные приложения за счет кэширования и диспетчеризации нагрузки.

Django реализует RAD-концепцию организации технологического процесса разработки программных продуктов (Rapid Application Development – быстрая разработка приложений). Но самое главное, Django использует Python в качестве языка программирования, что расширяет его функциональные возможности в пользу сложной аналитики больших данных, их обработки и визуализации. Все перечисленное выгодно отличает Django от других подходов к веб-разработке и определяет его выбор в качестве инструмента реализации системы визуализации геофизических параметров в области аврального овала.

Важно отметить, что концепция MVC используется в Django в несколько измененном виде: фреймворк реализует архитектурный паттерн, обозначаемый как MVT (Model-View-Template) и являющийся модификацией MVC.

Клиент-серверное взаимодействие в рамках обозначенного паттерна осуществляется следующим образом. Управляющая логика приложения задана на уровне представлений, которые, в свою очередь, размещаются в файле Views.py и задаются набором функций с входным аргументом типа HttpRequest и возвращаемым значением вида HttpResponse. Каждое представление прикрепляется к проекту соответствующей ссылкой в файле URL.py (компонент, известный как диспетчер URL). При получении пользовательского запроса контроллер через файл URL.py определяет, какой серверный ресурс должен быть использован для формирования отклика, и перенаправляет параметры запроса соответствующему представлению.

В Django файл Views.py выполняет в некоторой степени роль контроллера, обрабатывающего поступивший запрос и формирующего ответ, вид которого для пользователя определяется шаблоном (Template). Шаблон содержит статический HTML и динамические данные, подстановка которых в результат описывается с помощью соответствующих программных инструкций. Вызовы шаблона осуществляются непосредственно из функции в представлении с помощью метода render пакета django.shortcuts, который выполняет указанный шаблон и возвращает экземпляр объекта HttpResponse с полученным содержимым.

Все обозначенные компоненты – контроллер, представления, шаблоны, URL-диспетчер – составляют Django-приложение. Взаимодействие последнего непосредственно с веб-сервером осуществляется по стандарту WSGI (Web Server Gateway Interface).

Веб-сервер исполняет код на основе полученного HTTP-запроса, извлекает его параметры и передает их вместе с функцией обратного вызова

(при наличии) в веб-приложение. Последнее обрабатывает запрос по описанной выше схеме и возвращает результат обратно на веб-сервер.

В процессе обработки и визуализации пространственно-распределенных значений геофизических параметров авроральной зоны используются CSV- и JSON-данные из сторонних источников. При этом во избежание коллизий, связанных с тем, что большинство браузеров следуют политике одного источника (*same-origin policy*), обращение к удаленным источникам данных осуществляется только на стороне сервера. Выполнение соответствующих сценариев осуществляется с началом сеанса работы пользователя с Django-приложением и предполагает отправку запроса к внешним источникам данных с передачей полученных в пользовательском сообщении параметров. Так, серверный python-сценарий обращается последовательно к данным NOAA о состоянии параметров в области аврорального овала, межпланетного магнитного поля и солнечного ветра. Результаты выполнения сценария передаются в соответствующий шаблон из Django-приложения и направляются веб-сервером на клиентскую сторону в качестве отклика для последующего рендеринга пользовательским агентом (браузером). Таким образом, работа с источниками визуализируемых данных осуществляется по принципу федерализации без отчуждения данных с последующим локальным сохранением наборов файлов на веб-сервере.

В формировании результирующего HTML-кода шаблонами веб-приложения использованы функциональные возможности двух внешних API. Первый из них – Google Visualization API (<http://www.google.com/jsapi>, модуль «visualization») – служит основой для формирования и рендеринга на клиентской стороне графиков, характеризующих изменение параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра по данным из сторонних источников. На начальном этапе отдельно подключаемый модуль Google-загрузчика (*loader.js*) создает шлюз для подключения графических компонент для формирования кода клиентской прорисовки графиков. Далее непосредственно в шаблоне методом *load* экземпляра класса *google.chart* к приложению подключаются необходимые внешние модули (в данном случае, например, '*corechart*', '*controls*'), на вход которым подается массив данных для визуализации. Наконец, после настройки графических компонент и указания HTML-элемента для привязки к нему формируемого графического контента метод *draw* по функции обратного вызова «прорисовывает» соответствующие графики на странице приложения.

Еще один сторонний API, используемый в приложении, отвечает за визуализацию пространственных данных, характеризующих распределение значений геофизических параметров в авроральной зоне с привязкой к географическим координатам. С этой целью используется ArcGIS API for JavaScript (<https://developers.arcgis.com/javascript/>). Работа с пространственным данным начинается с инициализации экземпляра класса *Map*, предназначенного для визуализации разнообразных картографических слоев. Один из последних



используется в качестве базового и формируется посредством класса BaseMap, который обращается к удаленному ArcGIS-серверу, получает с него картографическую подложку указанного в запросе типа и передает ее ранее созданному экземпляру класса Map (в рамках обозначенного веб-приложения картографической подложкой выступает ArcGIS-карта типа «streets-night-vector»).

Особенность визуализации используемых в работе данных заключается в большом числе пространственных точек (524288 точек), каждая из которых представляет собой отдельный экземпляр класса Point и, как следствие, отдельный DOM-объект для браузера. Последний в целях безопасности предусматривает ограничение создаваемого (и пририсовываемого) в пользовательском окне числа DOM-объектов, что проявляется в крайне низкой скорости рендеринга точек (уже на уровне, близком к полутысяче) и невозможности рендеринга (при числе точек, превышающем ~500 объектов). В этой связи в настоящей работе рендеринг пространственных точек ведется посредством их единовременного группирования в единый картографический слой с настройкой цветовой карты для диапазона визуализируемых составляющих его точек значениями.

Для решения поставленной задачи настраиваемые картографические слои, обеспечивающие визуализацию пространственного распределения значений параметров авроральной зоны, формируются как экземпляры класса LayerViewClass. В качестве входного параметра конструктор обозначенного класса принимает CSV-файл, содержащий данные, которые необходимо отобразить на карте. На выходе формируется картографический слой, привязанный к созданному ранее экземпляру картографической подложки.

На финальном этапе картографическая основа с прикрепленными слоями преобразуется в экземпляр виртуального глобуса посредством инициализации экземпляра класса SceneViewClass, также принимающем на вход слои и привязку к экземпляру карты. Результатом применения перечисленных слоев в рамках шаблона Django-приложения является поток данных, направляемых на клиентскую сторону в качестве отклика и содержащих HTML-код, стилевые таблицы и сценарии для выполнения и рендеринга в браузере.

2.2. Порядок выполнения работы

1. Запустить веб-приложение «Aurora Forecast» (<https://aurora-forecast.ru/>) через любой доступный браузер (рекомендуется Google Chrome или Safari).
2. С использованием элемента панели инструментов (в правой стороне главного окна, пиктограмма вида ) ввести дату и время из таблицы 2.
3. С использованием элемента панели инструментов (в правой стороне главного окна, пиктограмма вида ) выбрать слой с пометкой EPOT (рис. 4).

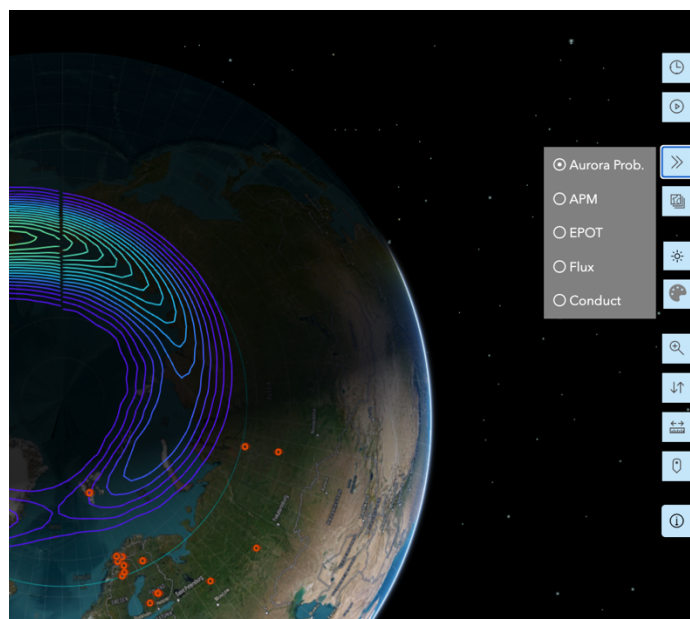



Рис. 4. Выбор пространственного слоя

Таблица 2

Данные для моделирования и визуализации

№	Дата	Время
1	2023-02-28	04:05
2	2023-02-27	18:55
3	2023-02-27	14:35
4	2023-02-26	20:35
5	2023-01-25	18:05
6	2022-12-07	20:05
7	2022-11-15	16:40
8	2022-10-10	08:00
9	2022-06-01	01:00
10	2022-03-02	03:00

4. После рендеринга обновленного пространственного изображения оценить пространственные характеристики сформированного набора пространственных изолиний и аврорального овала (рис. 5). Для этого воспользоваться инструментом измерения расстояний с панели инструментов (пиктограмма ). Измерить расстояние так, как это показано на рисунке 6.

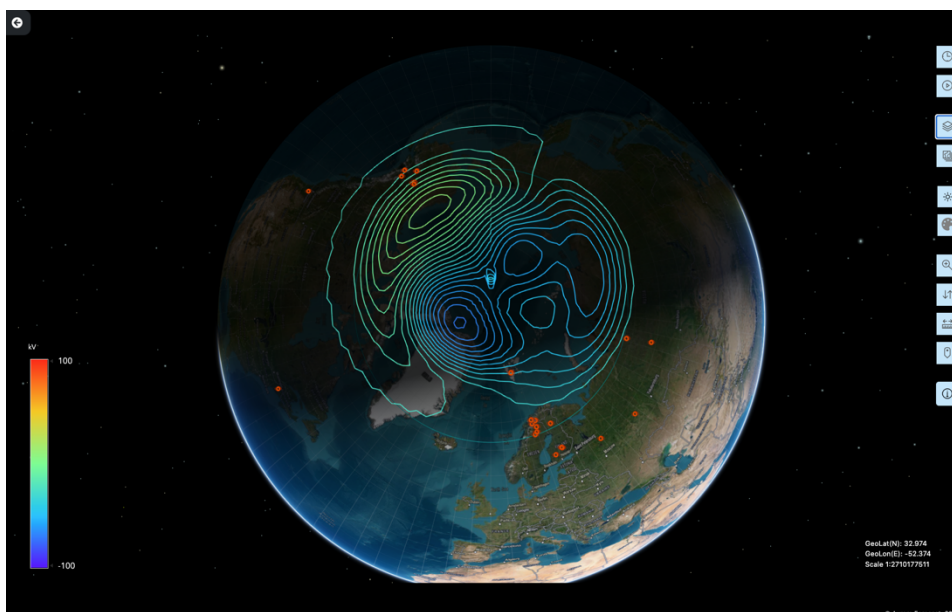


Рис. 5. Визуализация параметров электрического и магнитного потенциала в приложении «Aurora Forecast»

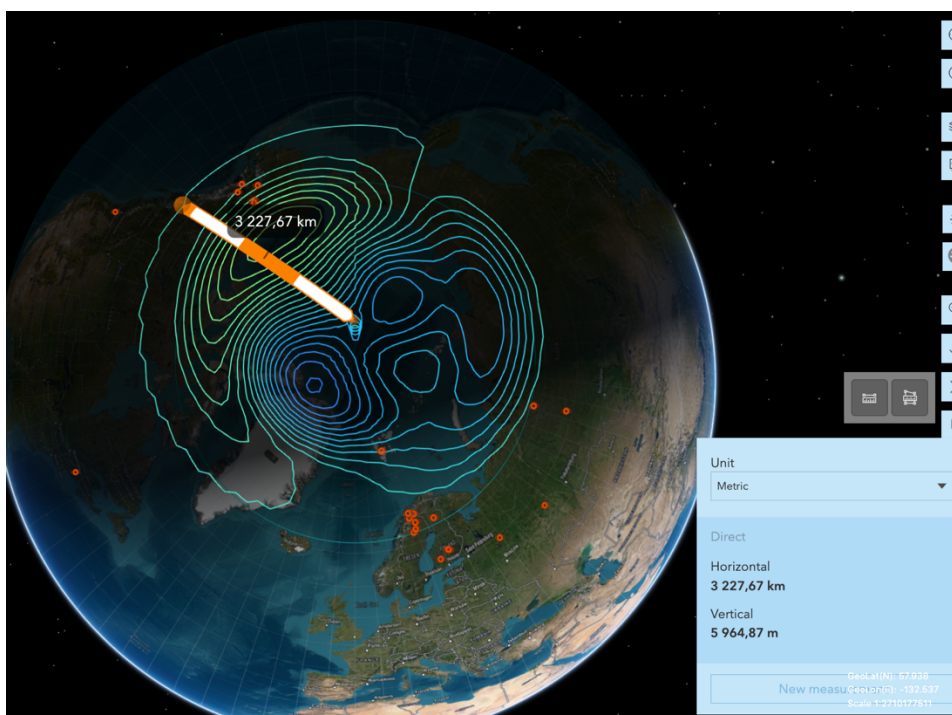


Рис. 6. Измерения расстояний с помощью инструментов «Aurora-forecast»

5. Записать полученное значение в таблицу результатов.

6. Аналогичным образом провести моделирование, визуализацию и анализ параметров потенциалов электрического и магнитного полей в области аврорального овала для остальных значений даты и времени из таблицы 2.

7. Для любого значения даты и времени из таблицы 2 выполнить визуализацию всех доступных дополнительных слоев: железные дороги, магнитные обсерватории и камеры всего неба.

2.3. Содержание отчета

- Титул.
- Цель и задачи работы.
- Общие теоретические положения.
- Описание интерфейса приложения «Aurora Forecast».
- Таблица результатов экспериментов в формате:

№	Дата, время (UT)	Минимальное значение EPOТ	Максимальное значение EPOТ	Радиус овала пространственных изолиний

- Скриншот задания 5 с визуализацией дополнительных слоев и описанием взаимного расположения аврорального овала и соответствующих техносферных объектов.
- Выводы по работе.

2.4. Контрольные вопросы

- Какие параметры аврорального овала характеризует модель Веймера?
- Для какого полушария выполняется расчет параметров по модели Веймера?
- Проведите анализ сопоставления вероятности наблюдения полярного сияния и EPOТ?
- Охарактеризуйте инструменты приложения «Aurora Forecast» для моделирования EPOТ?

2.5. Список литературы

1. Weimer D.R. (2005), Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates, *J. Geophys. Res.*, 110, A05306, doi:10.1029/2004JA010884
2. Weimer D.R., Clauer C.R., Engebretson M.J., Hansen T.L., Gleisner H., Mann I. and Yumoto K. (2010), Statistical maps of geomagnetic perturbations as a function of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 115, A10320, doi:10.1029/2010JA015540.
3. Weimer D.R. (2013), An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations, *Space Weather*, 11, 107–120, doi:10.1002/swe.20030
4. Воробьев А.В. Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, в. 6. – С. 963–972.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ ВЕБ-ГИС ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Цель работы: изучить инструмент верификации результатов моделирования аврорального овала как области наиболее вероятного наблюдения полярных сияний на основе данных камер всего неба.

Задание: для мгновенных значений даты и времени построить модели аврорального овала для северного и южного полушария, получить снимки с камер всего неба для различных пространственных точек в пределах аврорального овала.

3.1. Краткие теоретические сведения

Верификация компьютерной модели может быть выполнена путем сравнения предсказываемого пространственного распределения сияний с данными наблюдения камерами полного неба на высоких широтах (табл. 3). Для такого массового просмотра наличия или отсутствия сияний на 16 пунктах был использован подход «гражданской науки». Группа исследователей анализировали изображения с камер и регистрировали наличие/отсутствие сияний с занесением данных в соответствующую таблицу истинности (табл. 4). Эта таблица отмечает совпадение/несовпадение предсказания модели для данного пункта наблюдения с появлением сияний.

Доли ошибок первого ($B/(A+B)$) и второго ($C/(C+D)$) рода модели составляют 14 % и 26 % соответственно. При этом доля совпадения предсказанных и наблюдаемых полярных сияний ($A/(A+B)$), составляет 86 %. Общую точность компьютерной модели можно оценить как $(A+D)/(A+B+C+D) \sim 77$ %. Таким образом, даже такой грубый тест показывает достаточно высокую вероятность предсказаний модели ОР.

Таблица 3

Фоторегистраторы небосвода (All-Sky камеры), используемые для верификации компьютерной модели

№ п/п	Координаты, град.		Название	URL
	Сев. широта	Вост. долгота		
1	78.15	16.04	Svalbard, Norway	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/svalbard-norway-all-sky-aurora-live-camera.jpg
2	69.35	19.13	Ramfjordmoen, Norway	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/ramfjordmoen-norway-all-sky-aurora-live-camera.jpg

№ п/ п	Координаты, град.		Название	URL
	Сев. широта	Вост. долгота		
3	69.02	20.85	Kilpisjarvi, Finland	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/kilpissafarit-all-sky-aurora-live-camera.jpg
4	67.85	20.41	Kiruna, Sweden	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/kiruna-sweden-all-sky-aurora-live-camera.jpg?1634790312
5	67.41	26.60	Sodankyla, Finland	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/sodankyla-finland-all-sky-aurora-live-camera.jpg
6	66.95	19.82	Porjus, Sweden	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/porjus-sweden-west-view-aurora-live-camera.jpg
7	66.58	18.85	Jokkmokk, Sweden	https://jokkmokk.jp/photo/nr3/latest.jpg
8	66.00	76.00	Novy Urengoy, Russia	https://starvisor.ru/wp-content/uploads/webcam/capture_nur.jpg
9	64.75	-147.3	North Pole, Alaska	https://auroranotify.com/image10.jpg
10	63.07	-151.00	Denali, Alaska	http://denaliview1.ddns.net:8080/nph-jpeg.cgi
11	62.39	26.43	Hankasalmi, Finland	https://aurorasnow.fmi.fi/public_service/images/latest_SIR_AllSky.jpg
12	62.30	-145.27	Gakona, Alaska	http://optics.gi.alaska.edu/realtime/latest/gak_latest.jpg
13	62.25	26.59	Hankasalmi, Finland	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/hankasalmi-finland-all-sky-aurora-live-camera.jpg
14	61.58	-147.45	Wasilla, Alaska	https://auroranotify.com/kickaxcamimage.jpg
15	61.52	23.50	Tampere, Finland	https://aurorainfo.eu/aurora-live-cameras/tampere-finland-aurora-live-camera.jpg
16	61.00	77.00	Strezhevoy, Russia	https://starvisor.ru/wp-content/uploads/webcam/185/capture.jpg


Таблица истинности для оценки компьютерной модели

Прогноз наблюдения полярного сияния	Фактическое наблюдение полярного сияния	
	Наблюдается	Не наблюдается
Положительный	<i>A</i>	<i>B</i>
Отрицательный	<i>C</i>	<i>D</i>

3.2. Порядок выполнения работы

1. Запустить веб-приложение «Aurora Forecast» (<https://aurora-forecast.ru/>) через любой доступный браузер (рекомендуется Google Chrome или Safari).

По умолчанию доступны характеристики аврорального овала на текущий момент времени (UT).

2. С использованием элемента панели инструментов (в правой стороне главного окна, пиктограмма вида ) вывести список доступных дополнительных слоев (рис. 7).

3. Выбрать слой с камерами всего неба (параметр «Sky Cams»). Проверить наличие видимого слоя на виртуальном глобусе.

4. В пределах пространственных изолиний со значением вероятности наблюдения полярного сияния выбрать несколько доступных камер всего неба. Сделать снимок экрана и добавить его в отчет (рис. 8). Для пространственной точки, в которой размещается камера, выделить ближайшую изолинию и записать ее атрибутивное значение с вероятностью наблюдения полярного сияния. Записать в отчет соответствующее значение.

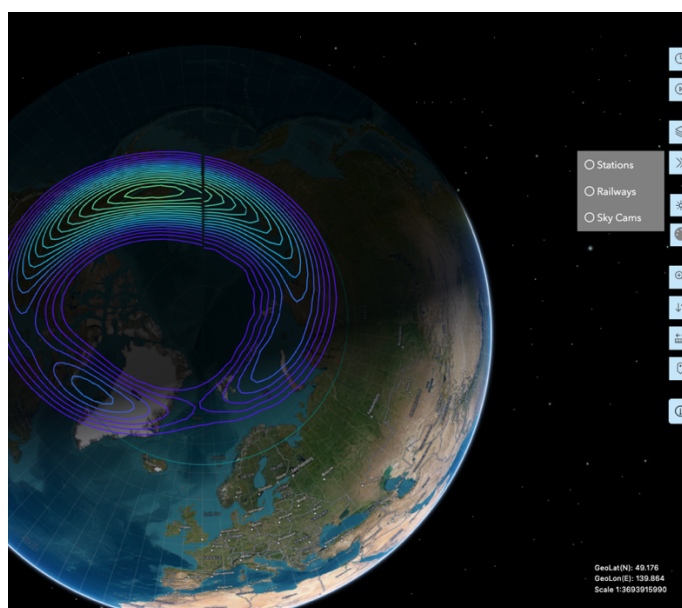


Рис. 7. Выбор дополнительного пространственного слоя в приложении «Aurora Forecast»

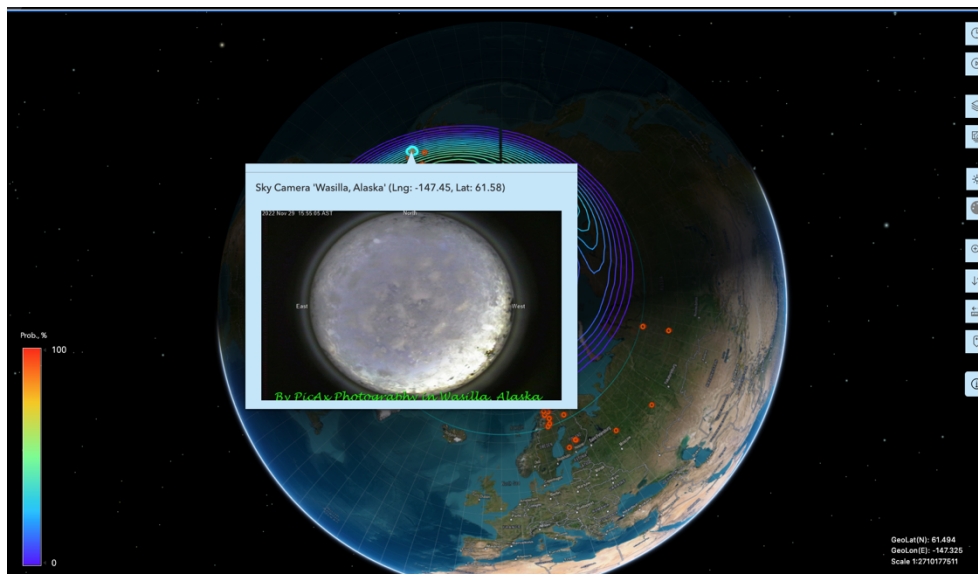


Рис. 8. Мгновенный снимок камеры всего неба в приложении «Aurora Forecast»

5. За пределами пространственных изолиний со значением вероятности наблюдения полярного сияния выбрать несколько доступных камер всего неба. Сделать снимок экрана и добавить его в отчет.

3.3. Содержание отчета

- Титул.
- Цель и задачи работы.
- Снимки экрана с данными камер всего неба в пределах аврорального овала. Каждому снимку поставить в соответствие значение вероятности наблюдения полярного сияния из ближайшей пространственной изолинии.
- Снимки экрана с данными камер всего неба за пределами аврорального овала.

3.4. Контрольные вопросы

- Что представляют собой камеры всего неба?
- Почему наиболее эффективна визуализация камер всего неба в виде точечных объектов?
- Что характеризует мгновенный снимок с камеры всего неба?
- Как верифицировать модель прогнозирования наблюдения полярных сияний с помощью камер всего неба?
- Как реализовано взаимодействие с камерами всего неба в приложении «Aurora Forecast»?

3.5. Список литературы

1. Martines-Bedenko V.A., Pilipenko V.A., Hartinger M.D., Engebretson M.J., Lorentzen D.A., Willer A.N. Correspondence between the latitudinal ULF wave power distribution and auroral oval in conjugate ionospheres. *Sun and Geosphere*. 2018. No. 13/1. P. 41-47.
2. Newell P.T., Sotirelis T., Wing S.J. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *Geophys. Res.* 2009. No. 114. P. A09207. DOI: 10.1029/2009JA014326.
3. 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. No. 12. P. 368–379. DOI: 10.1002/2014SW001056.
4. 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. *Russ. J. Earth Sci.* 2020. No. 20. P. ES6001. DOI: 10.2205/2020ES000721.
5. Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Appl. Sci.* 2022. No. 12. P. 1522. DOI: 10.3390/app12031522.
6. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Effect of magnetic activity on the global distribution of auroral precipitation zone. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005. Vol. 45, no. 4. P. 438–444.

Подписано в печать 15.05.2023 г. Формат 60x84/16.
Тираж 3 экз. Заказ 67.

*Редакционно-издательский центр
Уфимского университета науки и технологий
450076, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.*

*Отпечатано на множительном участке
Уфимского университета науки и технологий
450008, РБ, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*