
ИНТЕРАКТИВНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗА И АНАЛИЗА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

INTERACTIVE COMPUTER MODEL FOR AURORA FORECAST AND ANALYSIS

А.В. Воробьев 

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, geomagnet@list.ru
Уфимский государственный авиационный технический
университет,
Уфа, Россия

А.А. Соловьев 

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, a.soloviev@gcras.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия

В.А. Пилипенко 

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия

Г.Р. Воробьева 

Уфимский государственный авиационный технический
университет,
Уфа, Россия, gulnara.vorobeva@gmail.com

A.V. Vorobev

Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia, geomagnet@list.ru
Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia

A.A. Soloviev

Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia, a.soloviev@gcras.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,
Moscow, Russia

V.A. Pilipenko

Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,
Moscow, Russia

G.R. Vorobeva

Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia, gulnara.vorobeva@gmail.com

Аннотация. Разработана 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 виртуального глобуса 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 прогноза и анализа прошедших событий. Система обеспечивает возможность работы с пользовательскими слоями, т. е., например, сопоставления картины пространственного распределения вероятности полярных сияний с сетью железнодорожных транспортных систем для территории РФ.

Ключевые слова: полярные сияния, магнитные бури, авроральная зона, космическая погода, геоинформационная система.

Abstract. An interactive computer model of a short-term (with a horizon 30–70 min) forecast of aurora intensity has been developed in the form of a web-based geoinformation system. The OVATION-Prime empirical model is used as the basic software, which establishes statistical relationships between parameters of the solar wind, the interplanetary magnetic field, and auroral particle fluxes. On the basis of this model, a system has been built which simulates the spatial planetary distribution of the probability of observing auroras and a number of accompanying quantities. Data visualization is carried out on the basis of the virtual globe technology and is provided to the end user via a specialized web service. The forecast has been verified by comparing the model predictions with the data from 16 cameras conducting continuous observations of the auroras in the visible spectrum. The proportion of coincidences between the predicted and observed auroras was 86 %. The developed service enables both forecasting and analysis of past events. The system allows us to compare the spatial distribution of probability of auroras with railway transport systems for the territory of the Russian Federation.

Keywords: auroras, magnetic storms, auroral zone, space weather, geoinformation system.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшие риски, связанные с негативным влиянием космической погоды на показатели надежности объектов земной техносферы — перегрузки линий электропередач [Pulkkinen et al., 2005; Соколова и др., 2019; Пилипенко, 2021], отказы систем энергораспределения и автоматики железных дорог [Птицына и др., 2008; Розенберг и др., 2021] — происходят на высоких широтах в области аврорального овала, представляющего пояс интенсивной светимости, создаваемой вторжением в атмосферу электронов из околоземного пространства. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС [Afraimovich et al., 2009; Захаров и др., 2020; Демьянов, Ясюкевич, 2021] также испытывают проблемы с точностью и отказоустойчивостью. Так, именно в области аврорального овала из-за характерных для нее резких градиентов, высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы и электроджетов регистрируются частые срывы фазы навигационного сигнала и экстремальные ошибки местопределения. Вследствие этого на GPS-приемниках погрешность высокоточной навигации (режим PPP) может увеличиваться до пяти раз относительно фонового уровня в области высыпания авроральных электронов в ионосферу [Yasyukevich et al., 2020]. 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.

Предложено несколько подходов к мониторингу пространственных и энергетических характеристик аврорального овала. С авроральным овалом тесно связаны ионосферный электроджет и геомагнитные Pc5-пульсации, что дает принципиальную возможность слежения за положением овала по наземным геомагнитным данным [Martines-Bedenko et al., 2018; Пенских и др., 2021].

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 данные наземных или спутниковых оптических наблюдений. Модель, предсказывающая планетарное распределение различных типов высыпаний авроральных частиц на основе статистического анализа данных низкоорбитальных спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), разработана в ПГИ [Vorobjev, Yagodkina, 2005]. 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) [Newell et al., 2014], основанная на данных 21 года (около двух солнечных цик-

лов) наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий спутниками DMSP. Эта модель параметризована по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), передающимся в режиме реального времени с межпланетных спутников, что обеспечивает возможность оперативного прогноза динамики аврорального овала.

На базе модели OP создан поддерживаемый Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) веб-сервис [https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast], который дает визуализацию краткосрочного прогноза планетарного распределения вероятности полярных сияний. Также известны проекты Университета Аляски [https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast], Метеорологической службы Исландии [https://en.vedur.is/weather/forecasts/aurora] и пр., ориентированные на региональный мониторинг фрагментов аврорального овала.

Изучение принципов работы и анализ архитектуры перечисленных выше и других аналогичных программных продуктов выявили ряд характерных повторяющихся от реализации к реализации недостатков веб-сервисов — отсутствие интерактивности; невозможность динамического масштабирования и добавления пользовательских слоев; отсутствие базовых инструментов для пространственного анализа визуализируемых параметров; инвариантность набора визуализируемых параметров, что значительно усложняет эффективное применение сервисов такого рода.

Таким образом, разработка и модернизация компьютерных моделей, обеспечивающих многопараметрический прогноз и визуализацию свойств аврорального овала, а также позволяющих проводить их оперативный геопро пространственный анализ, является актуальной задачей, решение которой способно обеспечить значимый эффект как в области фундаментальных исследований, так и в приложениях, нацеленных на поддержку принятия решений при управлении сложными техническими объектами в Арктическом регионе.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

В качестве базового математического обеспечения используется эмпирическая модель OP [Newell et al., 2009], принимающая на вход параметры солнечного ветра и ММП. Основу модели составляют регрессионные коэффициенты, определяемые сезоном, типом полярных сияний и набором координат, всего включающие 245 760 регрессионных соответствий (4 сезона \times 4 типа полярных сияний \times 96 отсчетов местного времени \times 160 отсчетов геомагнитной широты). Локальная мощность высыпаний в авроральной зоне p_A рассчитывается из соотношения:

$$\begin{cases} p_A(\text{MLat}, \text{MLT}, Q, G) = a + b \left(\frac{d\Phi}{dt} \right), \\ \frac{d\Phi}{dt} = V^{4/3} B_T^{2/3} \sin^{8/3} \left(\frac{\theta}{2} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

где $M_{Lat} \in \{[50...90] \cup [-50...-90]\}$ — магнитная широта с шагом 0.25° ; $M_{LT} \in [0...24)$ — магнитное локальное время с шагом дискретизации 0.25 ч; a, b — регрессионные коэффициенты, определяемые сезоном Q и типом полярного сияния G для каждого значения M_{Lat} и M_{LT} [<https://github.com/kilcommons/OvationPyme>]; $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока на магнитопаузе, Вб/с; V — скорость солнечного ветра, км/с; B_y и B_z — компоненты ММП, нТл; $\theta = \arctan(B_y/B_z)$; $B_T = (B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ — полное поперечное к линии Земля—Солнце поле.

Объединив четыре основных типа полярных сияний, можно построить пространственное распределение суммарной мощности светимости

$$P_A(M_{Lat}, M_{LT}, Q) = \sum_{g=1}^G \left[a_g + b_g \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \right]. \quad (2)$$

Просуммировав выражение (2) по долготе и широте отдельно для каждого полушария, можно получить интегральную оценку мощности полярных сияний в Северном (N) и Южном (S) полушариях [Newell et al., 2009]:

$$P_A^{(N,S)}(Q) = \sum_{g=1}^G \sum_{m=-90}^{90} \sum_{n=1}^{360} \left[a_{g,m,n} + b_{g,m,n} \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \right], \quad (3)$$

Так, для $P_A \leq 20$ ГВт имеет место слабое или визуально неразличимое сияние; при $20 \leq P_A \leq 50$ наблюдение сияния возможно лишь на небольшом от него расстоянии; для $50 < P_A \leq 100$ сияние должно быть видимым невооруженным глазом; $P_A > 100$ соответствует экстремальной авроральной активности и значимому расширению аврорального овала к низким широтам.

Необходимые для модели данные о параметрах солнечного ветра (V) и ММП (B_y, B_z), регистрируемые спутниками ACE и DSCOVR на удалении $\sim 200R_E$ от Земли, предоставляются в режиме реального времени сервисами Центра прогноза космической погоды (SWPC) [<https://www.swpc.noaa.gov>] и Центра космических полетов им. Годдарда (GSFC) [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Наличие истории данных параметров межпланетной среды дает возможность проанализировать ретроспективное планетарное распределение сияний, предсказанное моделью ОР.

2. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В общем виде на выходе модели (2) прогноз характеристик аврорального овала как объект визуализации представляет собой массив пространственных и атрибутивных данных, обработку и графическую интерпретацию которых имеет смысл реализовывать на базе веб-ГИС-технологий. Накопленный опыт построения веб-ориентированных ГИС для визуализации геофизических параметров [Воробьев и др., 2020, 2021; Vorobev et al., 2020] показал состоятельность такого рода программно-инструментальных средств решения поставленных задач.

По способу представления пространственных данных современные ГИС можно разделить на клас-

сические плоские карты и виртуальные глобусы. Принимая во внимание высокоширотный характер расположения целевых объектов, значимыми преимуществами виртуальных глобусов будут являться качество визуального восприятия виртуальной модели и отсутствие картографических искажений проекций, свойственных плоским картам.

Таким образом, для решения поставленной задачи в первом приближении (без предъявления требований к интерфейсу, формату входных данных, инструментам, поддерживаемым языкам программирования и пр.) может использоваться целый спектр картографических библиотек, обеспечивающих на уровне веб-приложения работу с данными, имеющими пространственную привязку, и обладающими режимом визуализации виртуального глобуса (ArcGIS API, Cesium, Google Maps Platform, NASA World Wind, WebGLEarth и др.). Однако, принимая во внимание возможность использования языка программирования Python-3, набор адаптированных к решаемым задачам методов обработки пространственных данных, широкое сообщество и развитую поддержку, подсистему визуализации результатов моделирования предлагается строить на базе библиотек ArcGIS API [<https://developers.arcgis.com/javascript/3>]. Поскольку скорость рендеринга результатов моделирования во многом определяется разрешением подгружаемых слоев, а также учитываемая установленное пространственное разрешение модели ОР по широте (0.25°) и долготе (3.75°), предполагается, что для достижения поставленной цели допустимо ограничиться мелкомасштабными картографическими подложками с масштабом от 1:2 000 000 до 1:10 000 000.

3. АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Предлагаемая архитектура программной системы (рис. 1), формализующая компьютерную модель прогноза полярных сияний, основана на сочетании монолитной (традиционной для веб-приложений поколения Веб 2.0), микросервисной и модульной структур, свойства которых в совокупности обеспечивают высокую реактивность, гибкость и расширяемость приложения в целом. Предлагается трехуровневая клиент-серверная архитектура, обеспечивающая отделение данных и бизнес-логики программной системы от ее визуального представления для конечного пользователя. Данный подход минимизирует требования к аппаратному и программному обеспечению клиентской стороны, практически сводя их к наличию устройства с клиентским агентом (браузером) и стабильным выходом в Интернет.

Программный код реализуется таким образом, что семантически сходные вычислительные процессы объединены в отдельные программные модули, предполагающие оперирование входной и выходной информацией в зависимости от решаемых задач обработки данных. Модульная архитектура программного кода не только позволила выделить однотипные операции в системе, но и показала очевидные преимущества в процессе как функционального, так и нагрузочного тестирования; а на уровне клиентской

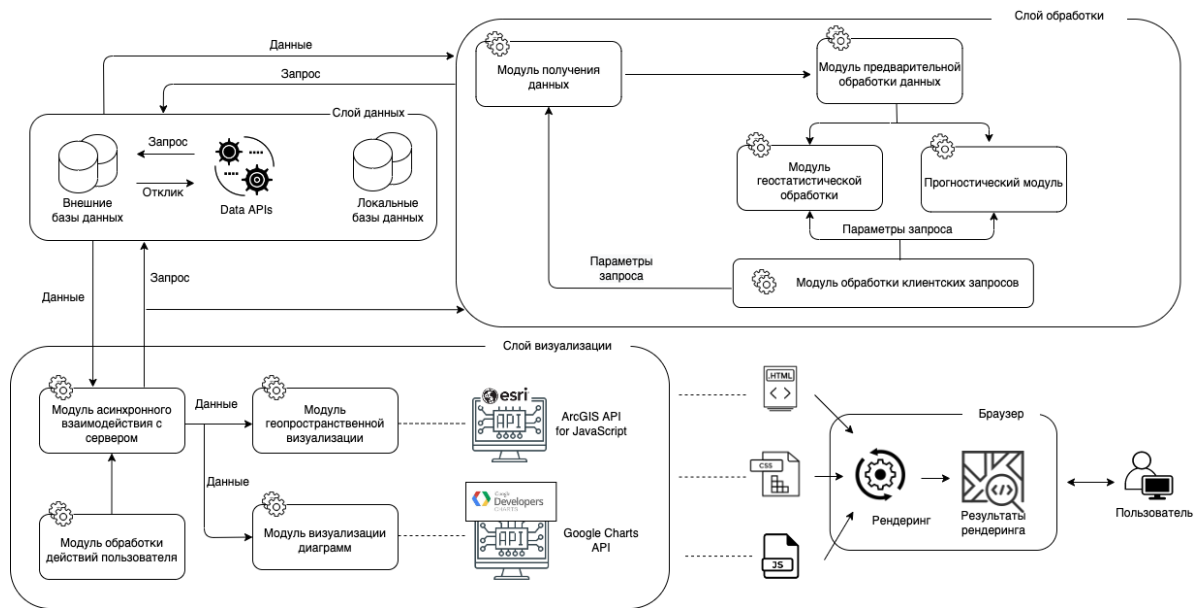


Рис. 1. Архитектура информационной системы

стороны — и визуального тестирования, и рефакторинга кода при разработке. При этом семантические группы программных модулей рассматриваются как отдельные слои.

В рамках описываемой архитектуры программной системы на серверную сторону вынесены функциональные модули, обеспечивающие получение, обработку, анализ и интерпретацию пространственных данных. Кроме того, здесь же обеспечивается размещение локальных баз данных, а также фоновое (по принципу Cron) выполнение программных процессов обращения к внешним источникам данных. При этом внешние провайдеры данных могут обеспечивать собственный API, реализующий «точку входа» к соответствующим данным, а также предоставлять сторонним пользователям и приложениям доступ по одному из сетевых протоколов (как правило, FTP). В контексте реализации взаимодействия с данными на уровне рассматриваемого веб-приложения предусмотрены оба подхода, каждый из которых обеспечивает получение необходимых для обработки, анализа и интерпретации данных. Важно отметить разнородность участвующих в информационном обеспечении приложения источников пространственных данных (форматы, шаг дискретизации, качественный состав данных и пр.). Взаимодействие с внешними источниками данных вынесено на серверную сторону для обеспечения безопасности приложения и предотвращения коллизий, вызванных совместным использованием ресурсов различными источниками (CORS — Cross-origin resource sharing).

Основная бизнес-логика приложения сосредоточена в группе программных модулей под условным названием «слой обработки» (см. рис. 1). На его вход поступает пространственная информация от локальных и внешних источников данных из слоя данных, а формируемый в результате функционирования модулей результат представляет собой орга-

низованный в JSON (GeoJSON) набор пространственных данных, направляемый для последующего рендеринга на клиентскую сторону.

Модули в слое обработки последовательно получают управление соответствующим информационным потоком, а также обеспечивают его обработку на основании параметров клиентского запроса (здесь могут быть учтены элементы горизонтальной/вертикальной фильтрации данных, запрашиваемая операция обработки и/или анализа и пр.). При этом одной точкой входа для слоя является модуль, обеспечивающий получение данных от их источников (одноименный модуль на рис. 1). В результате функционирования указанного модуля формируется виртуальное временное хранилище, где размещаются для последующей обработки поступившие от источников данных информационные массивы. Парной точкой входа в слой является модуль, обеспечивающий обработку поступающего с клиентской стороны запроса. В процессе его функционирования из полученного запроса извлекается набор параметров с соответствующими значениями, которые, в свою очередь, определяют характер обращения к источникам данных, а также процедуры их обработки и анализа.

Поскольку рассматриваются гетерогенные источники данных, сформированный в результате работы предшествующего программного модуля массив данных передается модулю предварительной обработки. Функциональность рассматриваемого модуля предполагает приведение обрабатываемых данных к общему виду (нормализацию), а также устранение препятствий на пути их последующей обработки (поиск пропусков и помех в данных). Далее в зависимости от поступившего с клиентской стороны запроса выполняется прогноз и статистическая обработка значений соответствующих пространственных данных. В результате функционирования соответствующего программного модуля

формируется выходной поток пространственных данных, представленных в формате JSON (GeoJSON), который передается на клиентскую сторону приложения. С точки зрения программной реализации рассматриваемая архитектура строится на базе паттернов фреймворка Django (Model—View—Controller), что обусловлено использованием на серверной стороне языка Python-3.

Клиентская часть веб-приложения имеет модульную структуру. В общем виде такие программные модули могут быть разделены на две группы: одна из них отвечает за обработку совершенных пользователем в приложении действий, а другая — за формирование визуализируемого в процессе соответствующего рендеринга графического представления обработанных на сервере пространственных данных. Действия пользователя, обеспечивающие формирование запроса к источникам данных, обрабатываются одноименным модулем и далее передают соответствующие параметры в программный модуль взаимодействия с сервером. Последний, в свою очередь, взаимодействует с сервером в асинхронном режиме, позволяя пользователю выполнять действия в приложении в ожидании ответа от сервера. Он же управляет экземплярами программных объектов, обеспечивающих соединение с веб-сервером, передачу ему запросов методом GET, а также ведет обработку поступивших откликов. Сформированные сервером наборы пространственных данных принимаются программным объектом и передаются модулю визуализации. Предлагаемая модель формализована в виде веб-ориентированного сервиса, доступного на [<http://aurora-forecast.ru>].

Для оценки качества разработанной информационной системы, реализующей компьютерную модель краткосрочного прогноза полярных сияний в видимом спектре, было проведено нагрузочное тестирование, обеспечивающее оценку производительности и отказоустойчивости веб-приложения. 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. Максимальная производительность программной системы на представленной конфигурации составила 15 соединений (4816 обработанных запросов) за час. Длительное 24-часовое тестирование на отказоустойчивость выявило нестабильность функционирования веб-приложения после отключения половины вычислительных машин серверного кластера, что в будущем может быть компенсировано горизонтальным масштабированием комплекса технических средств системы.

Морфологические свойства модельных полярных сияний

Для грубой оценки правдоподобности модели ОР мы рассчитали по ней ряд морфологических характеристик полярных сияний. Компьютерная модель позволяет вывести в цифровом виде различные характеристики модельных полярных сияний, которые

затем пользователь может анализировать различными методами. На рис. 2, а показан сезонный ход медианного значения параметра P_A^N , полученного на основании выражения (3), за период ноябрь 2020 г. – октябрь 2021 г. (аналогичный ход параметра P_A^S , для Южного полушария практически идентичен). Согласно полученным результатам, P_A^N имеют выраженную сезонную зависимость с максимумами в весенние и осенние месяцы (рис. 2, а). Эта зависимость согласуется с известным сезонным распределением сияний [Хорошева, 1967].

Знание статистического распределения характеристики природного явления дает возможность оценить вероятность его экстремальных значений. На рис. 2, б показана статистика прогноза интегрированного значения P_A для Северного полушария Земли за анализируемый период (статистика P_A для Южного полушария имеет аналогичный характер). Полученное распределение $P_A^N \equiv P$ соответствует экспоненциальному закону (6),

$$PDF(P) = \exp(-P), \quad (6)$$

где PDF — функция плотности вероятности. При увеличении суббуревой активности распределение P приобретает признаки лог-нормального закона (рис. 2, в):

$$PDF(P, s) = \frac{1}{sP\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2 P}{2s^2}\right), \quad (7)$$

где s — параметр формы. Логнормальный закон распределения характерен для магнитосферно-ионосферных явлений. Так, Hardy et al. [2008] проанализировал спектры электронов, зарегистрированных на девяти спутниках DMSP. Анализ этого обширного архива данных показал, что распределения вероятностей потоков энергии соответствовали либо логнормальному закону (7), либо суперпозиции нескольких логнормальных распределений.

Таким образом, согласно рис. 2, б, для минимума солнечного цикла среднегодовую вероятность наблюдения полярных сияний можно оценить как ~2.4 % ($P_A^N \geq 50$ ГВт), а вероятность наблюдения экстремальных сияний составит ~0.1 % ($P_A^N \geq 100$ ГВт).

4. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Верификация компьютерной модели выполнялась путем сравнения предсказываемого пространственного распределения сияний с данными наблюдения камерами полного неба на высоких широтах (табл. 1). Для такого массового просмотра наличия или отсутствия сияний в 16 пунктах был использован подход «гражданской науки» [Kosar et al., 2018]. Группа исследователей анализировала изображения с камер и регистрировали наличие/отсутствие сияний с занесением данных в соответствующую таблицу истинности (табл. 2). Эта таблица отмечает совпадение/несовпадение предсказания модели для данного пункта наблюдения с появлением сияний.

Таблица 1

Фоторегистраторы небосвода (AllSky камеры), используемые для верификации компьютерной модели

№	Координаты, град.		Название	URL
	N	E		
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
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 2

Таблица истинности для оценки компьютерной модели

Прогноз наблюдения полярного сияния	Фактическое наблюдение полярного сияния	
	наблюдается	не наблюдается
Положительный	A	B
Отрицательный	C	D

Примечание к таблице:

- A — число случаев, когда прогноз был положительный, при этом сияние наблюдалось;
 B — число случаев, когда прогноз был положительный, при этом сияние не наблюдалось;
 C — число случаев, когда прогноз был отрицательный, при этом сияние наблюдалось;
 D — число случаев, когда прогноз был отрицательный, при этом сияние не наблюдалось.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗА РИСКА ПРОМЫШЛЕННЫМ СИСТЕМАМ ОТ ВОЗМУЩЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Одной из особенностей разработанной компьютерной системы является возможность сопоставлять пространственные распределения аврорального овала и различных сложных пространственно-распределенных технологических систем. На рис. 3 показан результат моделирования пространственного распределения параметра p_A , приведенного к вероятности наблюдения полярных сияний для суббури

4 февраля 2022 г., 18:30 UT ($AE \sim 1480$ нТл). Зелено-желтый градиент изолиний определяет географические границы региона, внутри которого вероятность наблюдения полярных сияний составляет не менее ~60 %, желто-оранжевый — не менее ~85 %, оранжево-красный — не менее 99 %. Видно, что северные ветки Октябрьской (Мурманск—Москва) и Северной (Ярославль—Архангельск, Вологда—Воркута) железных дорог во время даже умеренных суббурь оказываются в зоне интенсивных полярных сияний и токовых систем аврорального овала. Интенсивные геоиндуцируемые токи (ГИТ) и электрические теллурические поля могут приводить к сбоям систем сигнальной автоматики на данных участках

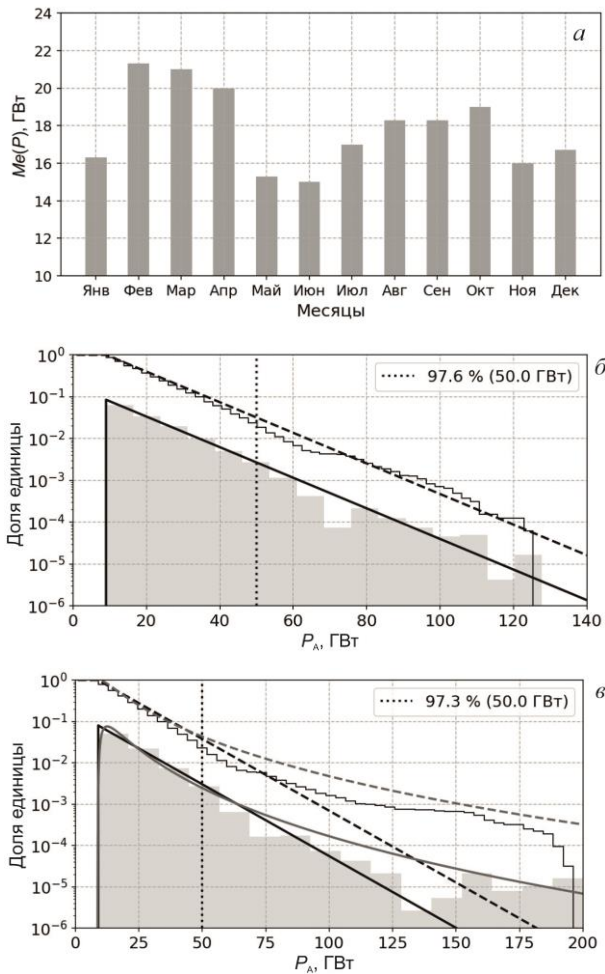


Рис. 2. Помесячные медианные значения интенсивности полярных сияний, сгенерированные компьютерной моделью для Северного полушария (а); статистика прогноза интегрированного значения P_A для Северного полушария за ноябрь 2020 г. — октябрь 2021 г. (б). Сплошными черными и штриховыми линиями обозначены функции плотности вероятности (PDF) и функция выживаемости экспоненциального закона распределения. Тонкая черная линия соответствует эмпирической функции выживаемости; в — статистика прогноза интегрированного значения P_A для Северного полушария за 2021 г. (серые и черные линии соответствуют логнормальному и экспоненциальному законам распределения соответственно)

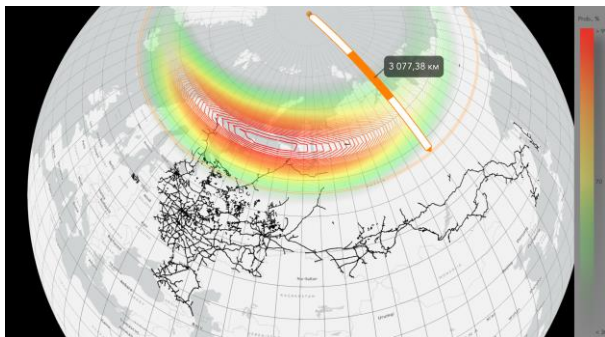


Рис. 3. Результат моделирования пространственного распределения параметра P_A

железной дороги [Касинский и др., 2007; Boteler, 2021].

Таким образом, предложенная компьютерная интерактивная модель краткосрочного (30–70 мин) про-

гноза пространственного распределения вероятности наблюдения полярных сияний способна обеспечить поддержку принятия управленческих решений, нацеленных на снижение рисков сбоя или отказа ряда технических систем высокоширотной инфраструктуры в периоды экстремальной геомагнитной активности.

В ближайшей перспективе планируется реализация поддержки тематических пользовательских слоев, включающих магистральные ЛЭП. Известно, что высокоширотные ЛЭП (например, Кольско-Карельский транзит 330 кВ) подвержены воздействию космической погоды [Vorobev et al., 2022]. ГИС, показывающая взаимное положение сетей ЛЭП и предсказываемого аврорального овала, даст возможность операторам сетей контролировать нагрузку, чтобы избежать отказов (вплоть до разрушения) силовых трансформаторов подстанций [Вахнина и др., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана многопользовательская компьютерная модель краткосрочного (с горизонтом 30–70 мин в зависимости от скорости солнечного ветра) прогноза интенсивности и пространственного распределения полярных сияний. Верификация результатов прогноза, выполненная путем сравнения результатов моделирования с данными камер полного неба, ведущих наблюдения полярных сияний в режиме реального времени, подтвердила адекватность модели. Доля подтвержденного прогноза сияний составляет более 86 %, доля ошибок первого и второго рода модели составляют 14 и 26 % соответственно.

Статистический анализ прогноза видимости полярных сияний, проведенный на базе модели ОР, показал, что для минимума солнечного цикла среднегодовую вероятность наблюдения полярных сияний в видимом спектре ($P_A^N \geq 50$ ГВт) можно оценить как ~2.4 %, при этом вероятность наблюдения экстремальных сияний ($P_A^N \geq 100$ ГВт) составит ~0.1 %.

Реализована поддержка тематических пользовательских слоев (сеть высокоширотных железных дорог и в ближайшей перспективе — магистральные ЛЭП), которая способна обеспечить принятие управленческих решений, нацеленных на снижение риска сбоев технических систем высокоширотной инфраструктуры в периоды экстремальной геомагнитной активности.

В настоящее время формализованная в виде специализированного веб-сервиса компьютерная модель находится на стадии бета-тестирования и доступна на [http://aurora-forecast.ru]. Согласно данным мониторинга, среднемесячная востребованность разработанного ресурса составляет ~1120 посещений, что, учитывая специфику предлагаемого сервиса, может свидетельствовать о его актуальности и востребованности. Любые предложения по усовершенствованию веб-сервиса будут приняты с благодарностью.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Шаповалов В.А. *Механизмы воздействия квазистационарных геоиндуцированных токов на электрические сети*. М., Инфра-инженерия, 2018. 256 с.

Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Еникеев Т.А., Воробьева Г.Р. Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций. *Компьютерная оптика*. 2020. Т. 44, вып. 5. С. 782–790. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-707](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-707).

Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Еникеев Т.А. и др. Система динамической визуализации геомагнитных возмущений по данным наземных магнитных станций. *Научная визуализация*. 2021. № 13.1. С. 162–176. DOI: [10.26583/sv.13.1.11](https://doi.org/10.26583/sv.13.1.11).

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 30–52. DOI: [10.12737/szf72202104](https://doi.org/10.12737/szf72202104).

Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В., Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 6. С. 769–782. DOI: [10.7868/S0023420616010143](https://doi.org/10.7868/S0023420616010143).

Касинский В.В., Птицына Н.Г., Ляхов Н.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47, № 5. С. 714–718.

Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 63–76. DOI: [10.12737/szf-72202106](https://doi.org/10.12737/szf-72202106).

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 73–110. DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).

Птицына Н.Г., Тясто М.И., Касинский В.В., Ляхов Н.Н. Влияние космической погоды на технические системы: сбоя железнодорожной аппаратуры во время геомагнитных бурь. *Солнечно-земная физика*. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 360–363.

Розенберг И.Н., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования железнодорожного транспорта в арктической зоне России. *Железнодорожный транспорт*. 2021. № 12. С. 48–54.

Соколова О.Н., Сахаров Я.А., Грицутенко С.С., Коровкин Н.В. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям. *Известия РАН. Энергетика*. 2019. С. 33–52. DOI: [10.1134/S0002331019050145](https://doi.org/10.1134/S0002331019050145).

Хорошева О.В. *Пространственно-временное распределение полярных сияний*. М.: Наука, 1967. 82 с.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Gamaunov I.F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43. P. 964–972. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015).

Boteler D.H. Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits. *Space Weather*. 2021. No. 19. e2020SW002609. DOI: [10.1029/2020SW002609](https://doi.org/10.1029/2020SW002609).

Hardy D.A., Holeman E.G., Burke W.J., et al. Probability distributions of electron precipitation at high magnetic latitudes. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A06305. DOI: [10.1029/2007JA012746](https://doi.org/10.1029/2007JA012746).

Kosar B.C., MacDonald E.A., Case N.A. A case study comparing citizen science aurora data with global auroral boundaries derived from satellite imagery and empirical models. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 177. P. 274–282. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.006).

Martines-Bedenko V.A., Pilipenko V.A., Hartinger M.D., et al. Correspondence between the latitudinal ULF wave power distribution and auroral oval in conjugate ionospheres. *Sun and Geosphere*. 2018. Vol. 13, no. 1. P. 41–47.

Newell P.T., Sotirelis T., Wing S.J. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *Geophys. Res. Lett.* 2009. No. 114. A09207. DOI: [10.1029/2009JA014326](https://doi.org/10.1029/2009JA014326).

Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*. 2014. No. 12. P. 368–379. DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).

Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*. 2005. No. 12. S08C03. DOI: [10.1029/2004SW000123](https://doi.org/10.1029/2004SW000123).

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](https://doi.org/10.2205/2020ES000721).

Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., et al. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*. 2022. No. 12. P. 1522. DOI: [10.3390/app12031522](https://doi.org/10.3390/app12031522).

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.

Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratoovsky K. Small-scale ionospheric irregularities of auroral origin at mid-latitudes during the 22 June 2015 magnetic storm and their effect on GPS positioning. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 10. P. 1579. DOI: [10.3390/rs12101579](https://doi.org/10.3390/rs12101579).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://en.vedur.is/weather/forecasts/aurora> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://github.com/lkilcommons/OvationPyme> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <https://developers.arcgis.com/javascript/3> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

URL: <http://aurora-forecast.ru> (дата обращения 4 октября 2021 г.).

Статья подготовлена по материалам Семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 7–11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 93–100. DOI: [10.12737/szf-82202213](https://doi.org/10.12737/szf-82202213).