

---

**ОНЛАЙН-СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ТОКОВ  
В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM**  
**ONLINE SYSTEM FOR ANALYZING CURRENTS  
IN THE UPPER IONOSPHERE ACCORDING TO SWARM SATELLITE DATA**

---

**И.О. Белов** *Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, i.belov@gcras.ru***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***М.Н. Добровольский** *Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, m.dobrovolsky@gcras.ru***Ш.Р. Богоутдинов** *Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, shm@gcras.ru  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия***К.Д. Калинин***Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, Kirillkalinckin@yandex.ru***I.O. Belov***Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, i.belov@gcras.ru***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***M.N. Dobrovolsky***Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, m.dobrovolsky@gcras.ru***Sh.R. Bogoutdinov***Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, shm@gcras.ru  
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia***K.D. Kalinkin***Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, Kirillkalinckin@yandex.ru*

---

**Аннотация.** Описана онлайн-система TeslaSwarm [<http://aleph.gcras.ru/teslaswarm>] для визуализации продольных токов в верхней ионосфере по данным низкоорбитальных спутников Swarm. Система дает исследователям простой и удобный инструмент для отбора событий и детального анализа токов и электромагнитных полей в верхней ионосфере. Пользователю предоставляется возможность отбора пролетов спутников над заданным регионом, визуализации структуры геомагнитного поля и токов вдоль силовых линий, сопоставления картины продольных токов с картой высыпания авроральных частиц по модели OVATION-Prime и сохранения выбранных параметров в файле в текстовом формате. Показаны преимущества разработанной системы по сравнению с зарубежными аналогами. На практике сбор и подготовка исходных данных для экспериментов составляет примерно 80 % всей работы с данными. Использование предложенной онлайн-системы в значительной степени избавляет пользователя от наиболее трудоемкой работы по выбору интересующих сегментов пролета спутника и расчету характеристик по исходным измерениям.

**Ключевые слова:** продольные электрические токи, визуализация продольных токов, данные спутников Swarm, структура геомагнитного поля.

**Abstract.** In this paper, we describe the TeslaSwarm online system [<http://aleph.gcras.ru/teslaswarm>] for visualizing field-aligned currents in the upper ionosphere, using data from Swarm low-orbit satellites. The system provides researchers with a simple and convenient tool for event selection and detailed analysis of currents and electromagnetic fields in the upper ionosphere. The system user can select satellite passages over a given region, visualize the geomagnetic field structure and field-aligned currents, compare the pattern of field-aligned currents with the auroral particle precipitation map, using the OVATION-Prime model, and save the selected parameters in a file in text format. We demonstrate advantages of the developed system over its foreign analogues. In practice, the collection and pre-processing of raw data for experiments make up about 80 % of all work with data. The proposed online system largely saves the user from the most time-consuming work of choosing the required satellite passage segments and calculating the characteristics of interest from raw measurements.

**Keywords:** field-aligned electric currents, visualization of field-aligned currents, Swarm satellite data, geomagnetic field structure.

## ВВЕДЕНИЕ

Продольные электрические токи (ПТ) вдоль силовых линий геомагнитного поля обуславливают электродинамическую связь между околоземным пространством и земной ионосферой (рис. 1). Наличие такой связи играет ключевую роль в развитии магнитных бурь и суббурь, полярных сияний и других высокоширотных явлений [Wu et al., 2017]. Кроме стационарных токов магнитосферно-ионосферной системы, нестационарные ПТ могут переноситься альфвеновскими возмущениями в околоземной плазме, которые регистрируются наземными магнитометрами как геомагнитные ультранизкочастотные (УНЧ) пульсации [Park et al., 2017]. Возмущения геомагнитного поля у земной поверхности, создаваемые быстропеременными ПТ, ответственны за возбуждение геоиндуцированных токов в линиях электропередач (см. обзор [Пилипенко, 2021]).

Эффективным методом регистрации ПТ являются измерения их магнитного эффекта на низкоорбитальных спутниках [Neubert, Christiansen, 2003; Ritter et al., 2013]. Несмотря на естественные погрешности при пересчете величины магнитных вариаций в плотность ПТ, спутниковые миссии MAGSAT, Orsted и CHAMP позволили построить довольно полную картину крупномасштабных токовых систем в ионосфере [Papitashvili et al., 2002]. Чувствительность современных спутниковых магнитометров настолько высока, что позволяет уверенно регистрировать даже УНЧ-волны с относительной величиной магнитных возмущений порядка нескольких миллионных от внешнего геомагнитного поля [Pilipenko, Heilig, 2016].

В настоящее время на низкой околоземной орбите работает спутниковая группировка Swarm, запущенная в ноябре 2013 г. [Friis-Christensen et al., 2006]. Входящая в нее пара аппаратов А и С, разнесенных по долготе на  $1.4^\circ$ , позволяет комбинировать оценки ПТ (FAC — field-aligned currents) по разным методикам [Kervalishvili, Park, 2017]. В то время как крупномасштабная структура токов и ее управляющие параметры достаточно хорошо исследованы, мелкомасштабная структура токов и механизмы ее формирования остаются неясными. Измерения регистрируются спутником с определенной частотой (от 1 до 50 Гц в случае Swarm). Зная скорость движения спутника, можно определить минимальный пространственный размер возмущения, эффект которого может быть зафиксирован в данных спутника. В статье исследуются одногерцовые данные. Поскольку спутники Swarm имеют первую космическую скорость ( $\sim 8$  км/с), минимальный пространственный масштаб исследуемых структур по данным одного спутника больше 7.5 км, о чем сказано в разделе 2.5 (анализ ПТ). При анализе данных двух соседних спутников пространственный масштаб изучаемых неоднородностей будет определяться еще и расстоянием между спутниками (больше 150 км, см. раздел 2.5, анализ ПТ). Поэтому под мелкомасштабными мы понимаем структуры размером первых сотен километров. Учет ПТ становится необхо-

димым элементом при рассмотрении любого возмущения геомагнитного поля или события космической погоды.

В статье дано описание новой онлайн-системы TeslaSwarm для анализа ПТ по данным SWARM — многофункционального и удобного инструмента для анализа токов и электромагнитных полей в верхней ионосфере.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АРХИТЕКТУРЕ И ПРОГРАММНЫХ МЕТОДАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Онлайн-система TeslaSwarm развернута в свободном доступе [<http://aleph.gcras.ru/teslaswarm>]. Она представляет собой многофункциональный сервис по комбинированному анализу наземных геомагнитных данных и данных со спутников Swarm. Система дает для любого заданного интервала времени возможность визуализации возмущения геомагнитного поля, величины ПТ на выбранном спутнике и соответствующего им наземного отклика, а также формирования по запросу текстового файла с выбранными данными для дальнейшей работы вне системы. Общая архитектура системы схематично показана на рис. 2.

Для работы веб-части используется связка фреймворка Django и веб-сервера Apache. Остальной код бек-энда написан на Python-3.7. Взаимодействие клиент — сервер организовано следующим образом. Клиент на веб-странице [<http://aleph.gcras.ru/teslaswarm>] вводит интересующие его параметры и отправляет запрос на предоставление данных в виде либо изображения, либо текста (рис. 3). Фронт-энд, написанный на JavaScript, формирует строку запроса с указанными на странице параметрами и отправляет на сервер, который, в свою очередь, передает ее в функцию HttpRequest фреймворка Django. Управляющая логика, размещенная в файле views.py, обрабатывает запрос и, исходя из параметров, заданных клиентом, запускает внутренние скрипты в бекэнде. Взаимодействие Django с веб-сервером на Apache осуществляется с помощью протокола UWSGI, являющегося бинарной реализацией протокола WSGI (Web Server Gateway Interface). Он оптимизирован для ускорения взаимодействия сервера и приложений. После выполнения скриптов на стороне бек-энда сервера и перевода требуемых данных в текст или jpeg-изображение, фреймворк Django с помощью функции HttpResponse возвращает результат обратно клиенту в окно браузера. На стороне бек-энда преимущественно используется язык программирования Python.

Используемые в онлайн-системе данные группировки спутников Swarm загружаются из аппаратно-программного комплекса (АПК) МАГНУС [Gvishiani et al., 2016], который является интеллектуальным ядром ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» на базе ГЦ РАН [<http://ckp.gcras.ru>]. За установление сеанса соединения и импорта из SQL-таблиц

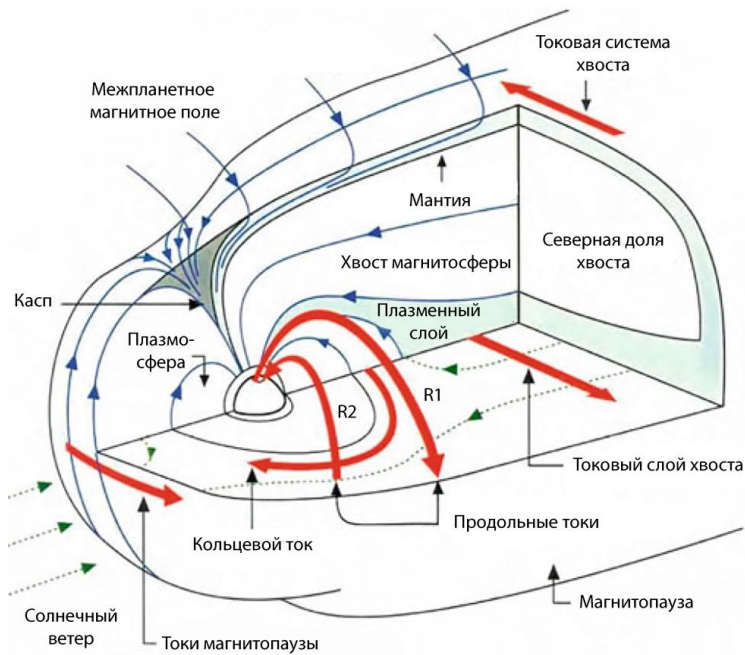


Рис. 1. Схема строения магнитосферы Земли (продольные токи отмечены в центре толстой красной линией) [Russell et al., 1995]

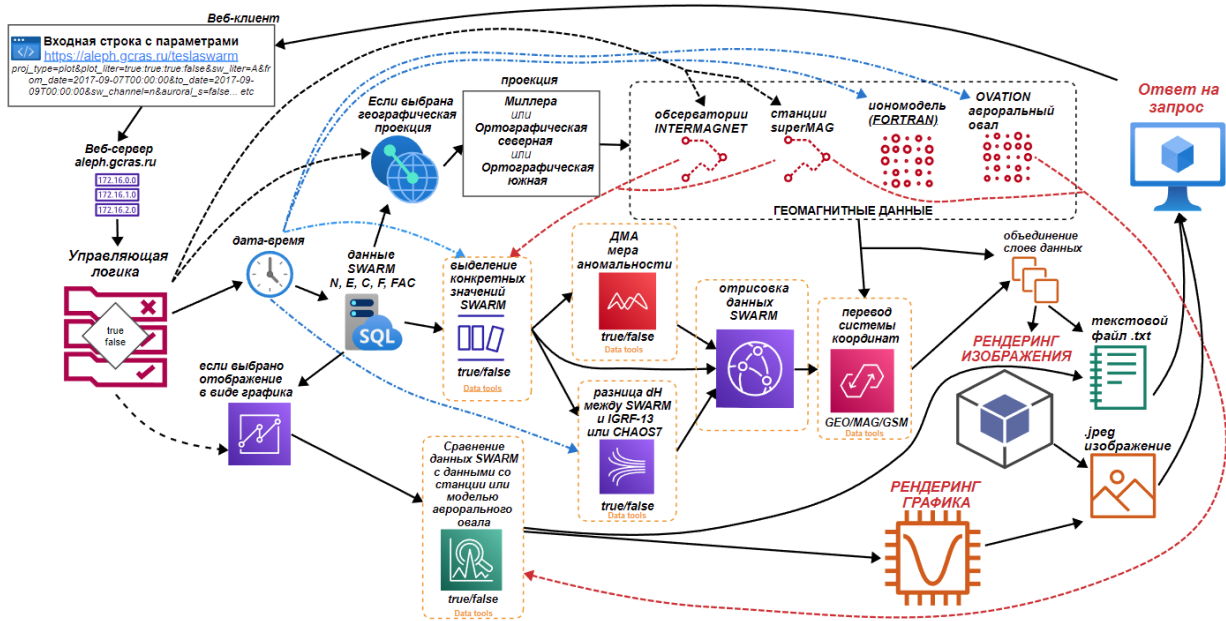


Рис. 2. Архитектура онлайн-системы TeslaSwarm. Блок-схема

(Structured Query Language — «язык структурированных запросов») системы МАГНУС отвечает библиотека Python pymysql [https://pypi.org/project/PyMySQL/]. В систему МАГНУС данные поступают с ftp сервера Европейского космического агентства (ESA) миссии Swarm [ftp://swarm-diss.eo.esa.int]. Ниже приведены параметры орбит группировки спутников Swarm:

- Swarm A: перигей орбиты ≤460 км, апогей орбиты ≤460 км, наклонение орбиты 87.4°;
- Swarm B: перигей орбиты ≤530 км, апогей орбиты ≤530 км, наклонение орбиты 88.0°;
- Swarm C: перигей орбиты ≤460 км, апогей орбиты ≤460 км, наклонение орбиты 87.4°.

В базе данных МАГНУС хранятся спутниковые данные с разрешением по времени 1 Гц. Разрешение спутниковых магнитометров в диапазоне от постоянного поля до 100 Гц составляет  $\frac{1 \text{ пТл}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ . Данные

имеют следующий формат:

- время, UTC;
- положение векторного магнитометра VFM в сферических геоцентрических координатах: географическая широта, географическая долгота, расстояние до центра масс Земли (м);
- значения трех компонент вектора магнитной индукции  $B_{\text{NEC}}$  (нТл) в локальной системе координат,

**Онлайн система для визуализации и анализа данных измерений продольных токов на спутниках SWARM**

Выберите тип проекции (Miller, Orthographic north, Orthographic south) или отображение графика (plot)

Выберите литер интересующего спутника SWARM, значения по ротору В J2 на двух близких спутниках А и С (FAC only), или же величину вектора разности SWARM-А и SWARM-С (A-C)

с даты   UTC

по дату   UTC

Трехкомпонентные значения магнитного поля (N, E, C), полный вектор магнитного поля (F), плотность продольного тока (FAC)

средний интервал, в секундах

Отображать минутные временные отметки пролета спутника SWARM

Если требуется отображение пролета спутника рядом с обсерваторией INTERMAGNET, выберите ее код и введите радиус в градусах, в пределах которого требуются значения пролета спутников SWARM

obs\_code

Отображение значений станций superMAG

superMAG

Если требуется отображение модели Ovation Prime (<https://doi.org/10.1029/2009JA014326>), введите дату и выберите полушарье (north и/или south)

auroral\_n

auroral\_s

Если требуется увеличение проекции до определенного прямоугольника, введите широту (lat) и долготу (lon)

min\_lon  max\_lon  min\_lat  max\_lat

Отображение разности векторов продольных токов между реальными данными, полученные со спутника SWARM и модели CHAOS-7

Отображение разности векторов продольных токов между реальными данными, полученные со спутника SWARM и модели IGRF-13

Поворот вектора магнитного поля в систему вдоль B0

ДМА мера аномальности значений пролета спутника SWARM

Отображение геомагнитной сетки координат

Перевод в геомагнитную сетку

Geophysical Center of Russian Academy of Sciences (GC RAS) © 2022  
contact: i.belov@gcras.ru

Рис. 3. Интерфейс клиента для ввода параметров и выполнения запроса к онлайн-системе TeslaSwarm

зависящей от положения спутника: N — северная компонента, E — восточная компонента, C — вертикальная компонента;

- модуль вектора магнитной индукции  $F$  (нТл), измеренный скалярным магнитометром;
- плотность продольных токов по данным отдельных спутников;
- плотность продольных токов по данным пары спутников А и С.

## 2. НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ

### 2.1. Запрос данных и их визуализация

Система TeslaSwarm предоставляет широкий инструментарий для визуализации и анализа исходных геомагнитных измерений, производных на их основе данных и вспомогательных электромагнитных параметров околоземной среды. Для любого заданного пользователем момента/интервала времени обеспечиваются:

- визуализация данных измерений магнитного поля Земли на аппаратах А, В, С миссии Swarm;
- визуализация положения и параметров аврального овала согласно модели OVATION-Prime [<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/Ovation-Prime~2.3>] [Воробьев и др., 2022];

- сопоставление с данными наземных магнитных станций, загружаемых с портала SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu>] при помощи библиотеки Python SuperMAG Web Service API [Gjerloev, 2012];
- сопоставление спутниковых наблюдений с моделями геомагнитного поля IGRF-13 [Alken et al., 2021] при помощи Python-библиотеки [<https://pypi.org/project/igrf>] или CHAOS-7 [Finlay et al., 2020] при помощи Python-библиотеки [<https://pypi.org/project/chaosmagpy>].

В системе предусмотрена визуализация интересующих параметров в виде функции времени и координат, а также в виде графика вдоль траектории движения спутника, спроецированной на поверхность Земли. Для второго случая пользователю доступны две проекции: Миллера (для средних и низких широт) и ортографическая (для приполярных широт). При этом пространственная привязка полученных измерений может быть представлена как в проекции положения спутников на поверхность Земли, так и в проекции точки пересечения силовой линии, сопряженной с положением спутника, с нижней кромкой ионосферы (высота 100 км над поверхностью Земли). Второй вариант используется в случае, когда пользователю необходимо знать, куда на земле попадет зарегистрированное спутником возмущение, переносимое продольными токами вдоль силовой линии (например, для корректного

сравнения с данными наземного магнитометра). Для получения информации о положении силовой линии используется модель T89 [Tsyganenko, 1989]. При визуализации данных в картографических проекциях обеспечивается отрисовка солнечного терминатора, что дает пользователю важную информацию о текущем положении Земли относительно Солнца, расположении часовых поясов местного времени и освещенности ионосферы.

При указании пользователем интересующей наземной станции система может осуществлять поиск всех доступных спутниковых пролетов в пределах заданного расстояния и вычислять вдоль них требуемые параметры. Эта функция является полезной при необходимости сопоставления наземных и спутниковых наблюдений магнитного поля за выбранный промежуток времени (рис. 4, а). На панели б красной звездочкой указано положение магнитной станции T47 (SALU) сети SuperMAG. Направление движения спутника вдоль проекции орбиты показано стрелками, сопровождаемыми отметками UT, шаг между которыми составляет 1 мин при выбранном временном интервале менее 30 мин. При этом возможна обрезка по явно заданным координатам.

Разные задачи требуют возможности преобразования спутниковых векторных данных из одной локальной системы координат в другую. К наиболее популярным системам относятся географическая (GEO), геомагнитная (MAG), геоцентрическая солнечно-магнитосферная (GSM) и система относительно текущего геомагнитного поля. Последняя в каждой заданной точке ориентирована вдоль вектора крупномасштабного магнитного поля  $\mathbf{V}(t)$ . Именно в такой системе корректно определяются ПТ (FAC). В зависимости от интересующего пользователя временного масштаба изучаемого возмущения указываются необходимые параметры пространственно-временного усреднения спутниковых измерений  $\mathbf{V}(t)$ . В итоге система выполняет пересчет в систему координат, ориентированную относительно усредненного поля. Например, усреднение поля в скользящем 100-секундном временном окне, соответствующем ~800 км пролета, позволяет фиксировать на его фоне флуктуации с периодами порядка нескольких десятков секунд. Тем самым пользователь имеет возможность оценки вклада в возмущение альфвеновской моды, переносящей продольный ток, и магнитозвуковой моды, связанной со сжатием магнитного поля.

## 2.2. Анализ продольных токов

Расчет плотности ПТ, предоставляемый Европейским космическим агентством в числе продуктов второго уровня (L2 products) миссии Swarm, осуществляется двумя путями. Здесь и далее, под  $J_1$  и  $J_2$ , мы подразумеваем продольные токи, рассчитываемые по разным алгоритмам.

Первый способ предполагает расчет  $J_1$  через  $\text{grad}\mathbf{V}$ , измеренного на отдельном спутнике с дискретизацией 1 с [Forsyth et al., 2017]. В позиции  $r$  единичные векторы замера магнитного поля NEC равны [Tøffner-Clausen, 2021]

$$\mathbf{e}_C = \frac{-r}{|r|},$$

$$\mathbf{e}_E = \begin{cases} \frac{a}{|a|}, a = \mathbf{e}_C \times (0\ 0\ 1)^T, \\ (0\ 1\ 0)^T, \text{ если } |a| = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_N = \mathbf{e}_E \times \mathbf{e}_C.$$

Временные ряды плотности ПТ определяются путем умножения радиальной плотности тока на угол наклона геомагнитного поля [Kervalishvili, Park, 2017]. В общем виде формула плотности вертикального тока имеет вид

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right], \quad (2)$$

где  $j$  — плотность тока;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость;  $B_x, B_y$  — поперечные компоненты магнитного поля (ось X направлена на север, ось Y — на восток, ось Z — вертикально вниз). При допущении, что токовые слои бесконечно вытянуты в зональном направлении, вторым членом правой части уравнения можно пренебречь. Тогда для плотности продольного тока (2) будет иметь вид

$$j_{\text{FAC}} = -\frac{j_{\text{IRC}}}{\sin I}, \quad (3)$$

где  $j_{\text{IRC}}$  — радиальная компонента тока по данным одного спутника с учетом вышеприведенных допущений;  $I$  — магнитное наклонение. Вблизи магнитного экватора и на широтах выше  $86^\circ$  FAC не оценивается. Радиальная плотность тока определена вдоль всей орбиты, пространственный масштаб составляет больше 7.5 км, точность измерений —  $10^{-6}$  мкА/м<sup>2</sup> [Swarm Level-2 Processing System Consortium, 2019].

Второй способ заключается в расчете  $J_2$  по  $\text{rot}\mathbf{V}$ , измеренного на двух соседних спутниках A, C по 1-секундным данным [Dunlop et al., 2015; Lühr et al., 2015]. Плотность ПТ может быть рассчитана только в высоких широтах, где магнитное поле в большей степени вертикально, т. е.  $I > 30^\circ$ . На меньших геомагнитных широтах временной ряд не определен. Радиальная плотность тока может быть рассчитана по всей орбите за исключением широт  $\theta > 86^\circ$  [Lühr et al., 2020]. Ее пространственный масштаб составляет более 150 км, точность измерений —  $10^{-6}$  мкА/м<sup>2</sup>. Данная точность соответствует характеристикам установленных на борту магнитометров, которые, в свою очередь, указаны в приведенной спецификации продуктов L2 [Swarm Level-2 Processing System Consortium, 2019, стр. 97]. Географическая привязка значений соответствует усредненной орбите пары спутников A, C. На рис. 5 показан пример визуализации плотности ПТ, рассчитанной двумя способами, в виде функции времени и координат (вверху) и в виде проекции на поверхность Земли (внизу). Значения токов и полей для выбранного временного интервала могут быть записаны в выходной текстовый файл в табличном виде: столбцы разделяются

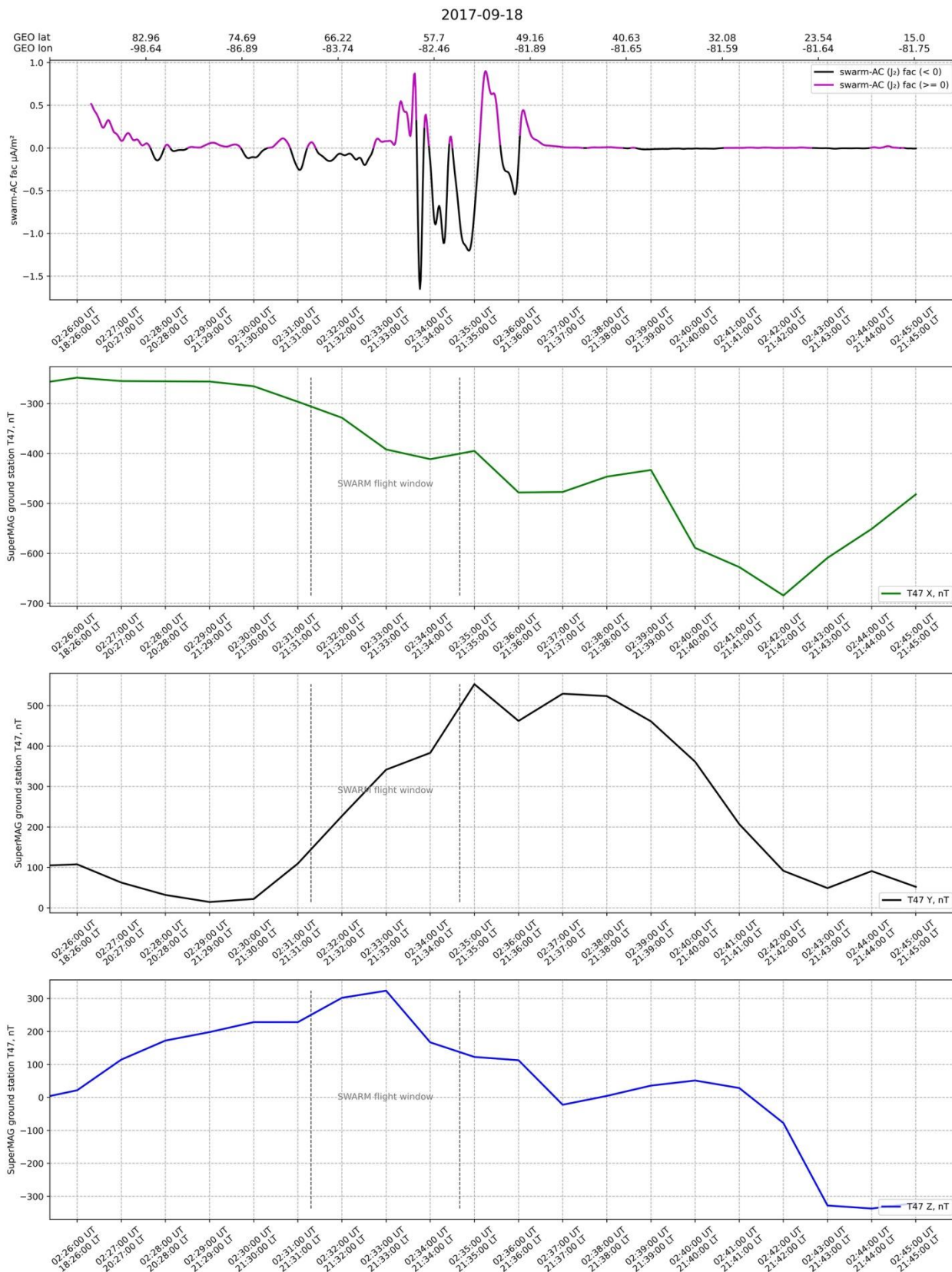


Рис. 4, а. Плотность ПТ по данным спутников А, С 18.09.2017 с 02:26:00 по 02:45:00 UT. Вверху — положительные и отрицательные значения (розовые и черные участки кривой); три компонента магнитного поля (x, y, z) станции T47 (SALU) за тот же интервал времени (три нижних графика). Вертикальные пунктирные линии — границы пересечения области радиусом  $10^\circ$  от станции. Здесь и далее примеры генерируются онлайн-системой TeslaSwarm

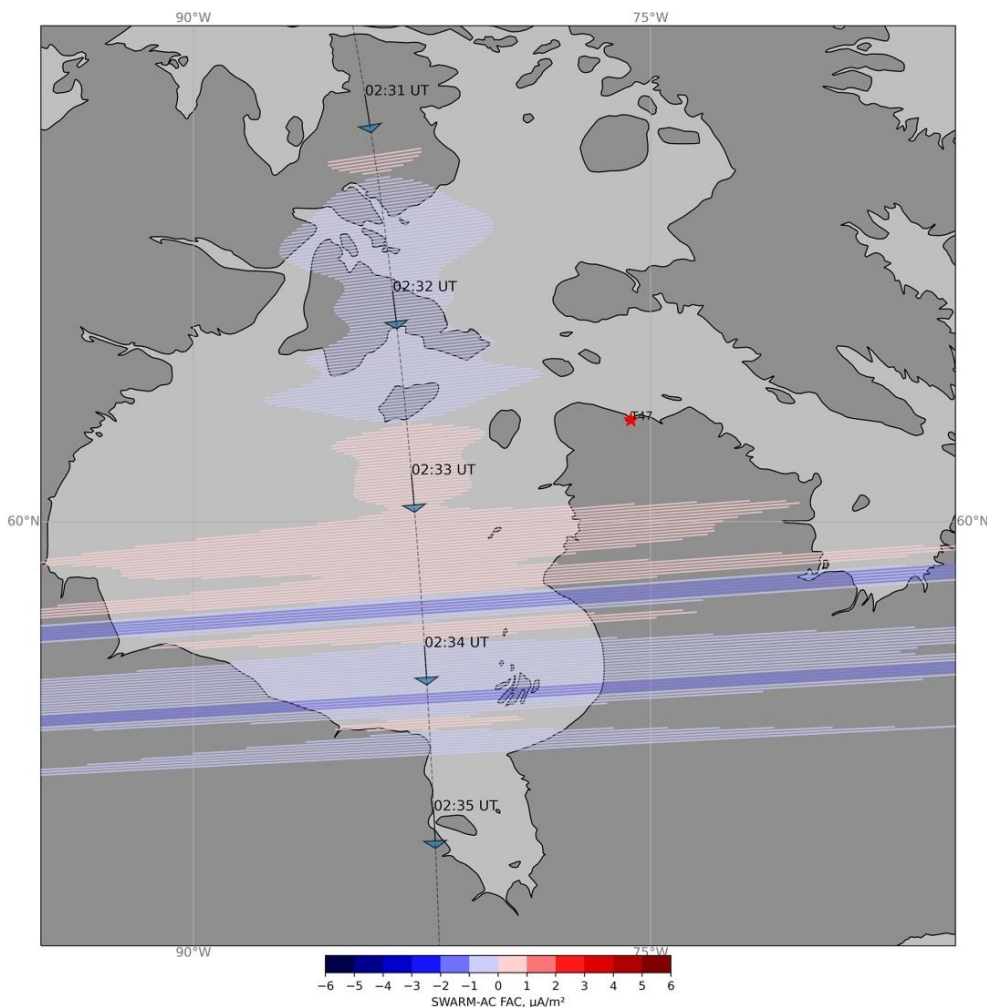
J<sub>2</sub>, 2017-09-18 02:25:00 -- 2017-09-18 02:45:00

Рис. 4, б. Усредненная траектория пролета спутников Swarm-A и Swarm-C (пунктирная линия) с указанием стрелками направления их движения; плотность ПТ вдоль пролета, отложенная симметрично траектории движения (цвет характеризует знак, длина перпендикулярных линий — амплитуду). Красная звездочка — положение станции T47 (SALU). Границы отображаемого на карте региона заданы пользователем

пробелом, первые две строки содержат описание данных.

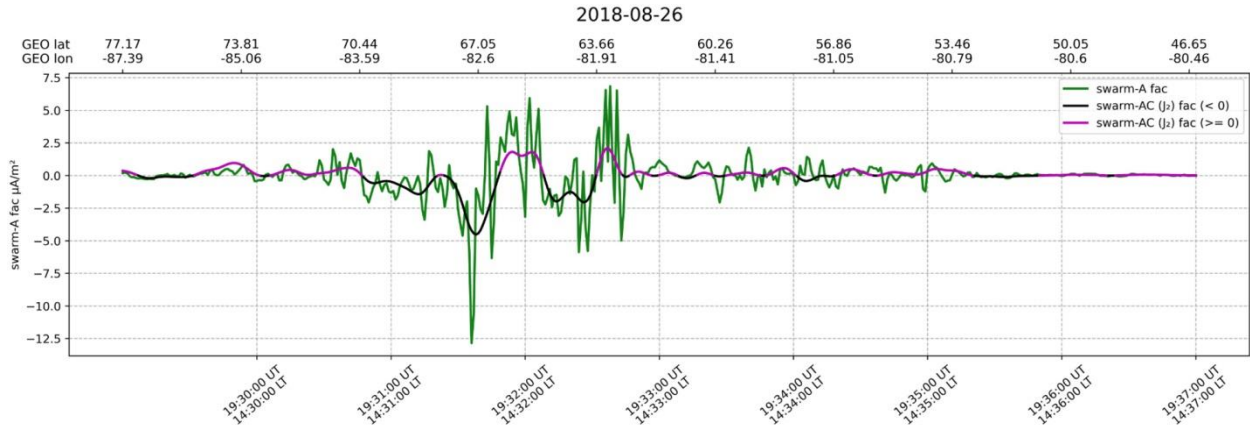
### 2.3. Сопоставление FAC и аврорального овала

Модель OVATION-Prime (OP) дает в географических координатах планетарное распределение интенсивности потоков высыпающихся авроральных частиц [Newell et al., 2014]. Повышенные значения этих потоков указывают на положение аврорального овала. Модель параметризована по характеристикам межпланетного магнитного поля и солнечного ветра. Соответствующие значения для изучаемого момента времени автоматически подгружаются из базы данных OMNIweb [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. Предполагается, что на временном интервале, соответствующем пересечению спутником аврорального овала (около 5 мин), его конфигурация не меняется. В текущей версии модели потоки частиц в Северном и Южном полушариях усредняются, что позволяет обойти наличие пробелов в данных и сглаживает возможные эффекты асимметрии между полушари-

ями. Модель аврорального овала дает пространственное распределение потоков энергии и потоков электронов разных энергий, ответственных за полярные сияния всех возможных типов [Machol et al., 2012], но в разработанной веб-системе используются высыпания только основных типов, соответствующие дискретным и диффузным сияниям. Пример измеренных ПТ в комбинации с положением аврорального овала за соответствующий интервал времени показан на рис. 6 (вверху). Как и следовало ожидать, границы аврорального овала проявляются в виде всплесков ПТ [Zanetti et al., 1998].

### 2.4. Анализ возмущенного векторного поля

Для выделения из спутниковых измерений и анализа локализованных пространственно-временных вариаций от внешних источников необходим учет вклада главного магнитного поля Земли. В системе реализован расчет параметров главного поля в соответствии с моделями IGRF [Alken et al., 2021] и CHAOS-7 [Finlay et al., 2020] для каждой точки пролета за рассматриваемую эпоху. В результате вычитания



J<sub>2</sub>. 2021-04-17 09:06:00 -- 2021-04-17 09:26:00

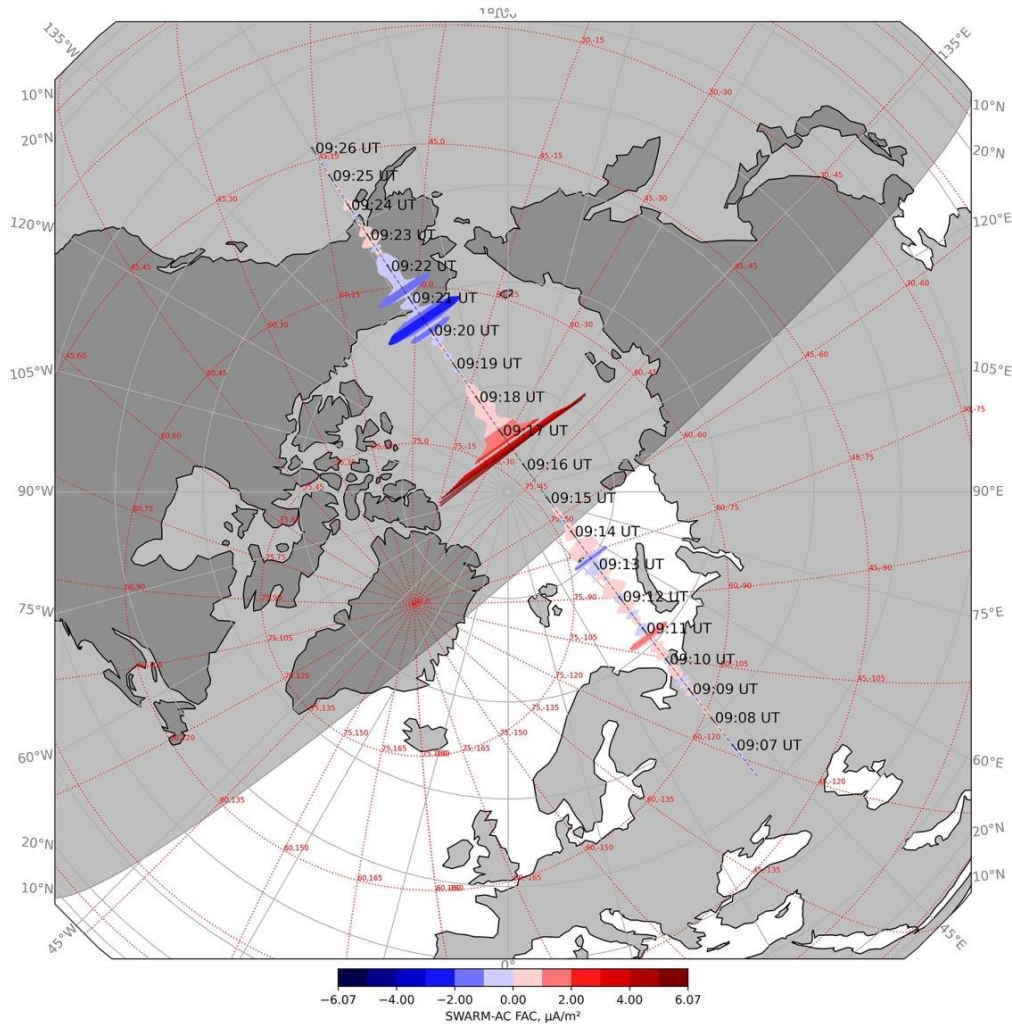


Рис. 5. Сопоставление значений  $J_1$  по данным спутника Swarm-A (зеленая кривая) и  $J_2$  по данным двух соседних спутников Swarm-A и Swarm-C 26.08.2018 в 19:29–19:37 UT (вверху); значения  $J_2$  вдоль усредненного пролета спутников А, С 17.04.2021 в 09:06:00–09:26:00 UT в северной ортографической проекции (внизу). Красные пунктирные линии — параллели и меридианы в геомагнитной дипольной системе координат

главного поля из спутниковых наблюдений пользователь имеет возможность работы с возмущенной составляющей наблюдаемого поля в горизонтальной проекции  $\Delta \mathbf{B} = \{\Delta N, \Delta E\}$ . На рис. 7, (вверху) показано

отображение возмущенного векторного поля вдоль проекции орбиты, а внизу — отображение возмущенного векторного поля в системе координат вдоль поля.



$J_1$ , 2021-04-17 09:06:00 -- 2021-04-17 09:26:00

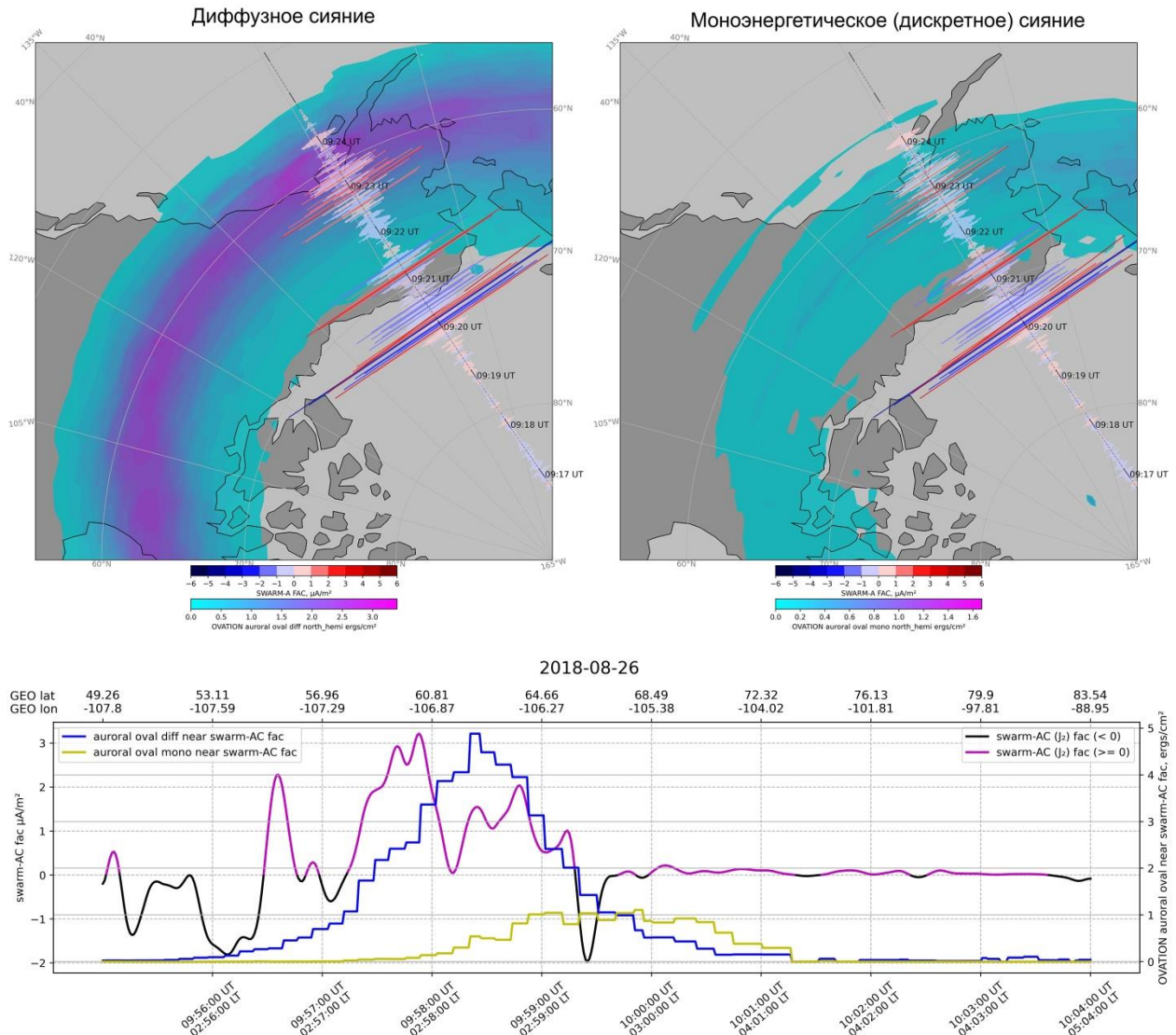


Рис. 6. Значения  $J_1$  по данным спутника Swarm-A вдоль траектории его движения 17.04.2021 в 09:06–09:26 UT (синекрасный цвет) на выделенном пользователем участке в северной ортографической проекции; интенсивность выпсыпания авроральных частиц для момента времени 09:16 UT 17.04.2021 (бирюзово-фиолетовое поле): диффузное сияние (слева), моноэнергетическое сияние (справа) (вверху); сопоставление значений  $J_2$  (фиолетово-черный цвет) по данным спутников A, C 26.08.2018 в 09:55:00–10:04:00 UT и значений интенсивности выпсыпания авроральных частиц вдоль пролета спутников (внизу). Синяя кривая — значения интенсивности потоков авроральных частиц вдоль пролета спутников (внизу) для диффузного сияния, желтая — для моноэнергетического

### 2.5. Распознавание и классификация аномалий на временных рядах

Для выделения во временных рядах возмущений, вычисляемых вдоль пролета спутника, и их ранжирования по степени аномальности имеется возможность использования дискретного математического анализа (ДМА) — серии алгоритмов, направленных на решение основных задач анализа данных: кластеризации и трассировки в многомерных массивах, морфологического анализа рельефов, поиска аномалий и тенденций в записях и т. д. Алгоритм, используемый в данной веб-системе, направлен на поиск аномалий в одномерных временных рядах [Agayan et al., 2016]. Каждому значению исходного ряда ста-

вится в соответствие значение из интервала  $[-1, 1]$ : чем меньше возмущенное значение из анализируемого временного ряда, тем значение ближе к  $-1$ , а чем аномальнее — тем ближе к  $1$ . Таким образом, в результате работы алгоритма формируется новый временной ряд с областью значений  $[-1, 1]$  и с той же, как у исходного ряда, областью определения. Работа алгоритма применительно к данным плотности ПТ показана на рис. 8.

### 3. СРАВНЕНИЕ С ПРИЛОЖЕНИЕМ VirES

Популярным веб-сервисом для визуального анализа данных спутников Swarm является VirES (The Swarm

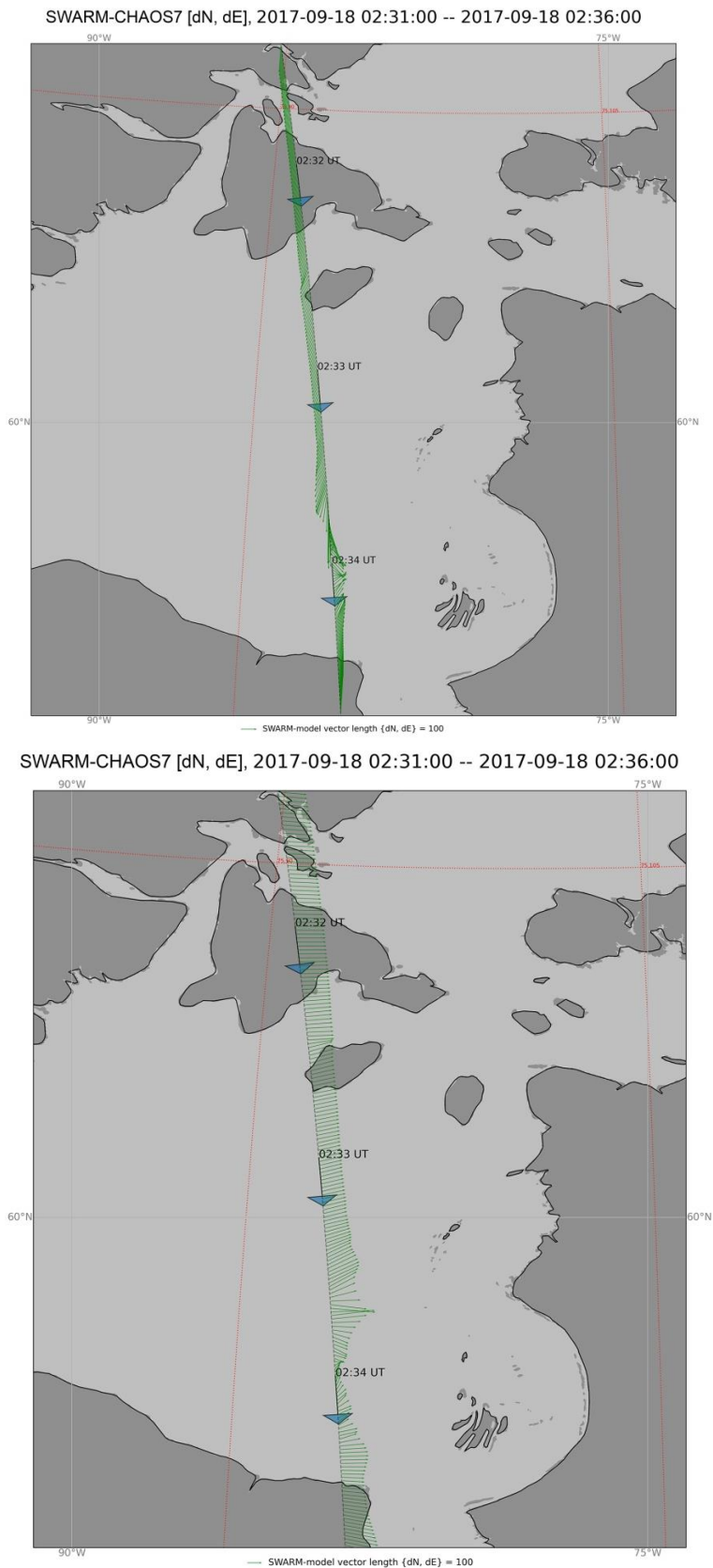


Рис. 7. Возмущенная составляющая наблюдаемого векторного поля  $\Delta\mathbf{B}=\{\Delta N, \Delta E\}$  (зеленые стрелки) в горизонтальной проекции 18.09.2017 в 02:31–02:36 UT на выделенном пользователем участке в проекции Миллера (вверху); возмущенная составляющая наблюдаемого векторного поля  $\Delta\mathbf{B}=\{\Delta N, \Delta E\}$  (зеленые стрелки) в проекции точки пересечения силовой линии вдоль пролета спутника SwarM-A (пунктирная линия) 18.09.2017 в 02:31–02:36 UT на выделенном пользователем участке в проекции Миллера (внизу). Масштаб к векторному полю указан внизу; красные пунктирные линии отображают сетку геомагнитных дипольных координат

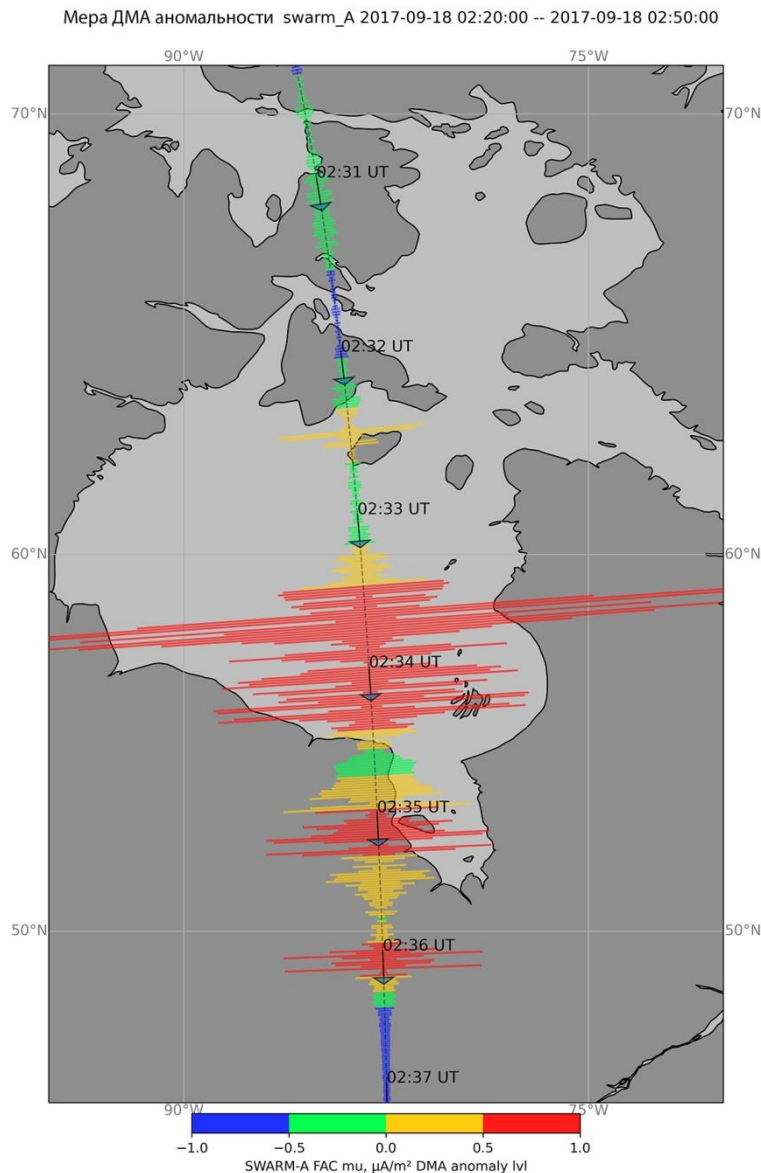


Рис. 8. Классификация плотности ПТ в соответствии с мерой аномальности ДМА вдоль пролета спутника Swarm-A (пунктирная линия) 18.09.2017 в 02:30–02:37 UT на выделенном пользователем участке в проекции Миллера: длина поперечных линий соответствует амплитуде плотности ПТ, цвет — значению меры аномальности  $[-1, 1]$

Virtual Research Environment, [<https://vires.services/>]) Европейского космического агентства и его веб-интерфейс Swarm Virtual Research Environment (VRE) [<https://vre.vires.services/>]. VirES представляет высокоинтерактивный веб-интерфейс для обработки и поиска данных из архива продуктов Swarm и других вспомогательных репозиториях. Он включает многомерную географическую визуализацию, интерактивное построение графиков и инструменты обработки для изучения магнитных моделей Земли и их временных вариаций для сравнения с прямыми измерениями спутников в глобальном контексте космической погоды. Подмножества данных Swarm, отобранные с помощью универсальных методов фильтрации, могут быть загружены в различных форматах кодирования. Загруженные данные могут быть объединены в соответствии с различными вариантами использования. Система удобна, прежде всего, возможностью интерактивного анализа данных спутника на трехмерном глобусе непосредственно

в веб-браузере. Помимо этого, VirES позволяет отображать следующие спутниковые данные:

- измерения с частотой 6 Гц полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы;
  - измерения плазмы (2 Гц) зондом Ленгмюра, включая электронную температуру и плотность плазмы;
  - измерения экваториального электроджета на дневной стороне.
- API VirES также предоставляет доступ к следующим измерениям магнитного поля:
- часовые, минутные и секундные данные наземных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ и соответствующему архиву Мирового центра данных по геомагнетизму Британской геологической службы, а также индексам геомагнитной и солнечной активности ( $Dst$ ,  $K_p$ ,  $F10.7$ );
  - данные виртуальных обсерваторий за 1 и 4 мес в рамках проекта Geomagnetic Virtual Observatories (GVO);

- векторные измерения магнитного поля, полученные в рамках миссий CryoSat-2, GRACE и GRACE-FO.

Возможно комбинирование на карте дополнительных геофизических слоев, построенных по следующим данным:

- модель главного магнитного поля Земли IGRF;
- модель магнитного поля CHAOS-7, описывающая вклад главного, литосферного и магнитосферного полей;
- покомпонентная разность геомагнитного поля, измеренного спутником, и модельного поля.

Для доступа к спутниковым данным возможно использование интерфейса Heliophysics Application Programmer's Interface [<https://github.com/hapi-server>].

Таким образом, базовый функционал приложений VirES и HAPI в системе TeslaSwarm также присутствует. Как говорилось выше, эффективный анализ ПТ вдоль силовых линий геомагнитного поля требует трансформации локальной системы координат, в которой измерен вектор магнитной индукции. Указанные приложения, в отличие от системы TeslaSwarm, соответствующим функционалом не обладают. Другим преимуществом представленной системы является возможность выделения пролетов спутников Swarm в заданном радиусе от выбранных станций сети SuperMAG для сопоставления наземных и спутниковых наблюдений магнитного поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование онлайн-системы в значительной степени избавляет пользователя от наиболее трудоемкой работы по выбору моментов пролета спутника через заданный регион, расчету движения вдоль земной поверхности геомагнитной проекции спутника и преобразованию данных в систему координат, ориентированную вдоль текущего геомагнитного поля. Система дает более общее представление о геофизической обстановке для исследуемого события — положении спутника относительно аврорального овала, фоновых вариациях магнитного поля и плотности ионосферной плазмы. Предлагаемая система находится в развитии, поэтому авторы будут признательны за любые предложения по ее совершенствованию.

Результаты, представленные в этой статье, получены с использованием данных, регистрируемых геомагнитными обсерваториями. Мы благодарим сотрудников национальных институтов, которые их поддерживают, сети ИНТЕРМАГНЕТ за продвижение высоких стандартов функционирования геомагнитных обсерваторий [<http://www.intermagnet.org>] и Межрегионального центра геомагнитных данных [<http://geomag.gcras.ru>] за свободное распространение данных в режиме онлайн. Данные Swarm представлены Европейским космическим агентством и доступны на [<ftp://swarm-diss.esa.int>]. Данные сети SuperMAG доступны на [<https://supermag.jhuapl.edu/>]. Программная реализация модели ОР находится в

свободном доступе на депозитории [<https://github.com/lkilcommons/OvationPyme>]. Для обработки пространственных данных используются библиотеки NumPy и Pandas, для отрисовки визуальной части — библиотеки Matplotlib-3.0 и Cartopy. В работе использовались данные и сервисы ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-77-30010.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. и др. 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).
- 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).
- Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., et al. The study of time series using the DMA methods and geophysical applications. *Data Sci. J.* 2016. Vol. 16. P. 1–21, DOI: [10.5334/dsj-2016-016](https://doi.org/10.5334/dsj-2016-016).
- Alken P., Thébaud E., Beggan C. D., et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73 (1), art. no 49. DOI: [10.1186/s40623-020-01288-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x).
- Dunlop M.W., Yang Y.Y., Yang J.Y., et al. Multi-spacecraft current estimates at Swarm. *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120, iss. 10. P. 8307–8316.
- Finlay C.C., Kloss C., Olsen N., et al. The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly. *Earth Planets and Space*. 2020. Vol. 72. DOI: [10.1186/s40623-020-01252-9](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01252-9).
- Forsyth C., Rae I. J., Mann I. R., Pakhotin I.P. Identifying intervals of temporally invariant field-aligned currents from Swarm: Assessing the validity of single-spacecraft methods. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. DOI: [10.1002/2016JA023708](https://doi.org/10.1002/2016JA023708).
- Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field. *Earth, Planets and Space*. 2006. Vol. 58. P. 351–358.
- Gjerloev J. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. A09213.
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnopero R., et al. Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment. *Data Sci. J.* 2016. Vol. 15. P. 18. DOI: [10.5334/dsj-2016-018](https://doi.org/10.5334/dsj-2016-018).
- Kervalishvili G., Park J. Swarm L2 FAC-single product description. Swarm Expert Support Laboratories (5). 2017. [https://cloud.gcras.ru/d/s/vsgRgEVWNkjvy7GDefXCxVkrT2Byy1EW/8FO5KX4RT-szECaxtrtgLOd5pXAvJzZt-\\_rvpHG-3wo](https://cloud.gcras.ru/d/s/vsgRgEVWNkjvy7GDefXCxVkrT2Byy1EW/8FO5KX4RT-szECaxtrtgLOd5pXAvJzZt-_rvpHG-3wo).
- Lühr H., Park J., Gjerloev J.W., et al. Field-aligned currents' scale analysis performed with the Swarm constellation. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 1–8. DOI: [10.1002/2014GL062453](https://doi.org/10.1002/2014GL062453).
- Lühr H., Ritter P., Kervalishvili G., et al. Applying the dual-spacecraft approach to the Swarm constellation for deriving radial current density. *Ionospheric Multi-Spacecraft Analysis Tools. ISSI Scientific Report Ser.* Springer, Cham. 2020. Vol. 17. DOI: [10.1007/978-3-030-26732-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_6).
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., et al. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurora. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, iss. 3. P. S03005. DOI: [10.1029/2011SW000746](https://doi.org/10.1029/2011SW000746).
- Neubert T., Christiansen F. Small-scale, field-aligned currents at the top-side ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. DOI: [10.1029/2003GL017808](https://doi.org/10.1029/2003GL017808).
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher dis-

turbance levels, *Space Weather*. 2014. Vol. 12. P. 368–379. DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).

Papitashvili V. O., Christiansen F., Neubert T. A new model of field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1683.

Park J., Lühr H., Knudsen D. J., et al. Alfvén waves in the auroral region, their Poynting flux, and reflection coefficient as estimated from Swarm observations. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. P. 2345–2360. DOI: [10.1002/2016JA023527](https://doi.org/10.1002/2016JA023527).

Pilipenko V., Heilig B. ULF waves and transients in the topside ionosphere, in: “Low-frequency Waves in Space Plasmas”. *Geophys. Monograph Ser.* 2016. Wiley/AGU. P. 15–29, DOI: [10.1002/9781119055006](https://doi.org/10.1002/9781119055006).

Ritter P., Lühr H., Rauberg J. Determining field-aligned currents with the Swarm constellation mission. *Earth Planets and Space*. 2013. Vol. 65, iss. 11. P. 1285–1294.

Russell C.T., Snare R.C., Means J.D., et al. The GGS/POLAR magnetic fields investigation. *Space Sci.* 1995. Vol. 71. P. 563–582.

Swarm Level-2 Processing System Consortium, Product specification for L2 Products and Auxiliary Products, Doc.no: SW-DS-DTU-GS-0001. 2019. С. 100.

Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planet. Space Sci.* 1989. Vol. 37. P. 5–20. DOI: [10.1016/0032-0633\(89\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90066-4).

Tøffner-Clausen L. Swarm level 1b product definition, 2021. SW-RS-DSC-SY-0007, iss. 5.26. [Available at [https://cloud.gcras.ru/d/s/vsgRgEVWNkjvy7GDefXCxVkrT2Byy1EW/8FO5KX4RT-szECaxtrtgLOd5pXAvJzZt-\\_rvGPhG-3wo](https://cloud.gcras.ru/d/s/vsgRgEVWNkjvy7GDefXCxVkrT2Byy1EW/8FO5KX4RT-szECaxtrtgLOd5pXAvJzZt-_rvGPhG-3wo)].

Wu J., Knudsen D.J., Gillies D.M., et al. Swarm observation of field-aligned currents associated with multiple auroral arc systems. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. DOI: [10.1002/2017JA024439](https://doi.org/10.1002/2017JA024439).

Zanetti L.J., Anderson B.J., Potemra T.A., et al. Identification of auroral oval boundaries from in situ magnetic field measurements. *J. Geophys. Res.* 1998, Vol. 103. P. 4187.

URL: <http://aleph.gcras.ru/teslaswarm> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <http://ckp.gcras.ru> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://pypi.org/project/PyMySQL/> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <ftp://swarm-diss.esa.int> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/Ovation-Prime~2.3> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://pypi.org/project/igrfu> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://pypi.org/project/chaosmagpy> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://vires.services/> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://vre.vires.services> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://github.com/hapi-server> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <http://www.intermagnet.org> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <http://geomag.gcras.ru> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

URL: <https://github.com/lkilcommons/OvationPyme> (дата обращения 3 ноября 2023 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Белов И.О., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Добровольский М.Н., Богоутдинов Ш.Р., Калинин К.Д. Онлайн система для анализа токов в верхней ионосфере по данным спутников Swarm. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 121–133. DOI: [10.12737/szf-94202314](https://doi.org/10.12737/szf-94202314).