Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 202–205.

УДК 550.385.4
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-202
ORCID: 0009-0001-8592-8486

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ И ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Е.А. Борвенко[1,2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, borvenko_egor@iszf.irk.ru
[2]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ANALYSIS OF GEOMAGNETIC STORMS AND IONOSPHERIC DISTURBANCES

E.A. Borvenko[1,2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, borvenko_egor@iszf.irk.ru
[2]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе представлена система комплексного анализа геомагнитных и ионосферных возмущений, предназначенная для совместной обработки разнородных данных космической погоды. Используемые данные включают параметры межпланетной среды, геомагнитные индексы, характеристики ионосферы и наблюдения полярных сияний, отличающиеся форматами хранения, временным разрешением и способами доступа. Для анализа событий, с целью получения физически значимых выводов, реализована последовательная загрузка, синхронизация, подготовка к визуализации и создание продуктов в единой вычислительной среде. В качестве примера рассмотрена геомагнитная буря 19–21 января 2026 года класса G4. Событие сопровождалось интенсификацией ионосферных неоднородностей в высокоширотной и экваториальной области на фоне снижения индекса Dst до -235 нТл. Анализ показал, что наиболее сильные ионосферные возмущения наблюдались в высокоширотных областях во время главной фазы бури. Полученные результаты демонстрируют возможность совместного исследования процессов в системе солнечный ветер, магнитосфера, атмосфера и ионосфера на основе унифицированного представления данных.

Ключевые слова: геомагнитные бури, ионосферные возмущения, космическая погода, геомагнитные индексы, полярные сияния, визуализация данных.

Abstract. This paper presents a system for making comprehensive analysis of geomagnetic and ionospheric disturbances with the use of heterogeneous space weather data. The analyzed data include interplanetary medium parameters, geomagnetic indices, ionospheric parameters, and auroral observations with different storage formats, temporal resolution, and access methods. For event analysis and subsequent physical interpretation, sequential data loading, synchronization, preparation for visualization, and product generation were implemented within a unified computational environment. As an example, we analyzed a severe (G4) geomagnetic storm on 19–21 January 2026. The storm was accompanied by development of ionospheric irregularities in the auroral and equatorial regions during drop in the Dst index till -235 nT. The analysis showed that the strongest ionospheric disturbances were observed in high-latitude regions during the main phase of the storm. The results obtained demonstrate the possibility of studying processes in the solar wind, magnetosphere, atmosphere, and ionosphere system with the use of a unified representation of observational data.

Keywords: geomagnetic storms, ionospheric disturbances, space weather, geomagnetic indices, aurora, data visualization.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные и ионосферные возмущения оказывают влияние на навигационные системы, радиосвязь, спутниковые технологии и энергетическую инфраструктуру [Schrijver et al., 2015]. Для исследования таких процессов используются различные экспериментальные средства диагностики околоземного космического пространства, включая спутниковые и наземные измерения, а с недавних пор и данные “гражданской науки”.

Экспериментальные научные установки предоставляют разнородные данные, отличающиеся форматами хранения, временным разрешением и способами доступа. Это усложняет совместную обработку и визуализацию информации. Кроме того, отсутствие единых способов анализа данных во время магнитных бурь затрудняет сравнение различных событий и повышает порог входа в область исследования.

Настоящая работа направлена на создание инструмента для комплексного анализа геомагнитных бурь и связанных с ними явлений в околоземном космическом пространстве, который бы включал в себя лучшие практики, применяющиеся для исследований. Совместное использование данных о солнечном ветре, геомагнитных индексах, ионосферных параметрах, глобальных ионосферных картах и наблюдениях полярных сияний позволяет сопоставлять процессы, происходящие в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Важной частью является стандартизованное представление данных, позволяющее сопоставлять различные события.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Для унификации данных, необходимых для анализа магнитных бурь, был использован опыт ИСЗФ СО РАН по исследованиям воздействия геомагнитных возмущений 25 цикла солнечной

активности [Yasyukevich et al., 2026]. Анализ геомагнитных событий и их последствий включает непосредственно сами данные, продукты и способы их представления для получения дополнительной информации, синтез различных типов данных в единое представление и физически значимые выводы.

Комплексный анализ геомагнитных бурь основан на совместном использовании данных о межпланетной среде, магнитосфере, ионосфере, полярных сияниях и космических лучах. В разработанной системе эти данные проходят последовательные этапы загрузки, синхронизации, подготовки к визуализации и построения графических представлений (Рис. 1). Такой подход позволяет сопоставлять параметры солнечного ветра, геомагнитные индексы, характеристики ионосферы и наблюдаемые авроральные явления в рамках отдельных событий.

Основой последующего анализа является временное и пространственное сопоставление подготовленных визуальных материалов. Временные ряды позволяют выделять основные фазы геомагнитного возмущения, а карты и кеограммы используются для оценки пространственного развития возмущений. Совместное рассмотрение этих представлений позволяет прослеживать развитие возмущений в различных частях околоземного космического пространства.

В качестве средства реализации был выбран язык Python и Jupyter notebook, позволяющий оперативно вносить необходимый изменения. Требование на реализацию включало возможность получения рисунков качества журнальных публикаций.

При анализе геомагнитных бурь особое внимание уделяется связи между фазами бури, смещением аврорального овала и изменением состояния ионосферы. Сопоставление моментов усиления геомагнитной активности с пространственным распределением ионосферных неоднородностей позволяет исследовать особенности отклика ионосферы во время сильных геомагнитных событий.

ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

В текущий момент реализована работа со следующими архивами научных данных.

OMNI [Papitashvili, King, 2020] – архив NASA, содержащий параметры межпланетного магнитного поля, солнечного ветра и индексы AE и SYM-H. Данные представлены минутными и часовыми рядами, а публикация данных может задерживаться на несколько недель.

SIMuRG [Yasyukevich et al., 2020] (System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS) объединяет данные более 6000 GNSS-приемников и предоставляет вариации полного электронного содержания (ПЭС), индекс ROTI, и вертикальный ПЭС. Скорректированный ПЭС рассчитывается с использованием глобальных ионосферных карт, что обеспечивает высокое временное и пространственное разрешение. Генерация продуктов требует предварительной обработки RINEX-наблюдений и может занимать несколько часов.

NMDB [NMDB, 2026] (Neutron Monitor Database) предоставляет минутные данные интенсивности космических лучей, полученные наземными нейтронными мониторами. Для отдельных станций возможны пропуски данных и усреднение значений при низком временном разрешении.

GIRO [Reinisch, Galkin, 2011] (Global Ionosphere Radio Observatory) – международная сеть цифровых ионозондов, предоставляющая данные foF2 и hmF2. Для расчета фоновых значений используется локальное временное окно ±13 суток, что требует загрузки больших массивов данных.

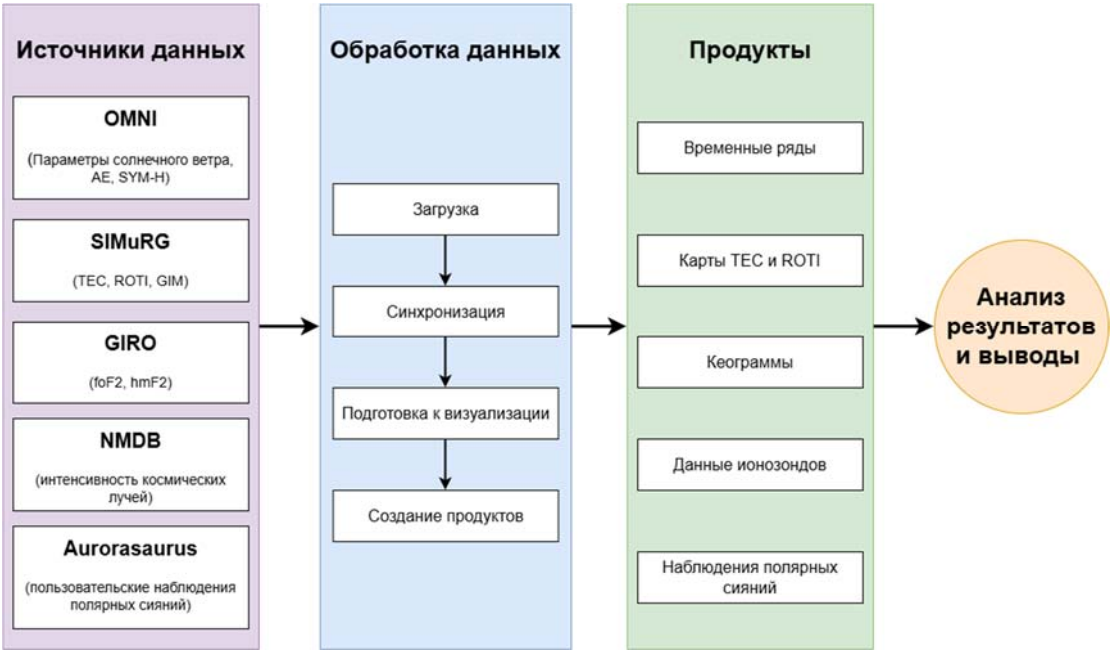

Рис. 1. Последовательность загрузки, обработки и визуализации данных космической погоды.

Aurorasaurus [Kosar et al., 2018] – база пользовательских наблюдений полярных сияний. В работе используется очищенный набор данных Web Observations, содержащий сообщения о наблюдениях за период с 1 августа 2014 г. по 2 августа 2025 г. Для каждого наблюдения доступны временная метка, географические координаты, длительность, а также сведения о форме и цвете сияния. Такие данные применяются для анализа пространственного распределения авроральной активности во время геомагнитных возмущений.

Дополнительно используются геомагнитные индексы Kp [Matzka et al., 2021] и Dst [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto et al., 2015]. Индекс Kp, рассчитываемый GFZ, характеризует уровень геомагнитной активности с временным разрешением 3 часа. Публикуемый WDC Kyoto индекс Dst отражает интенсивность кольцевого тока магнитосферы.

ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 19–21 ЯНВАРЯ 2026 Г.

В качестве апробации разработанного инструмента была рассмотрена геомагнитная буря 19–21 января 2026 г. В качестве физической гипотезы, мы хотим продемонстрировать зависимость положения границы аврорального овала ионосферных неоднородностей от фазы геомагнитной бури. Рис. 2 отображает пространственное распределение индекса ROTI для 19:30 UT 19 января (а) и 11:50 UT 20 января (б) и динамику геомагнитных индексов во время геомагнитной бури 19–21 января 2026 г. Панели “в” и “г” отражают изменение индексов Dst, SYM-H и Kp за рассматриваемый интервал.

Индексы Dst и SYM-H (Рис. 2в) демонстрируют резкое падение после 19 января 18:00 UT, указывая на начало главной фазы геомагнитной бури. Первый выраженный минимум наблюдается 19 января в 21:43 UT, после чего следует дальнейшее усиление бури. Минимальные значения Dst и SYM-H регистрируются 20 января в 11:50 UT: Dst опускается до -235 нТл, а SYM-H – до -257 нТл. После 12:00 UT 20 января начинается фаза восстановления, однако к концу 21 января индексы Dst и SYM-H еще не возвращаются к спокойному уровню.

Индекс Kp (Рис. 2г) подтверждает высокий уровень геомагнитной активности. С 19 по 21 января он длительное время сохраняется на уровне 6-9, а максимальное значение 9-, соответствующее буре класса G4, регистрируется в начале главной фазы – 19 января в 18:00 UT.

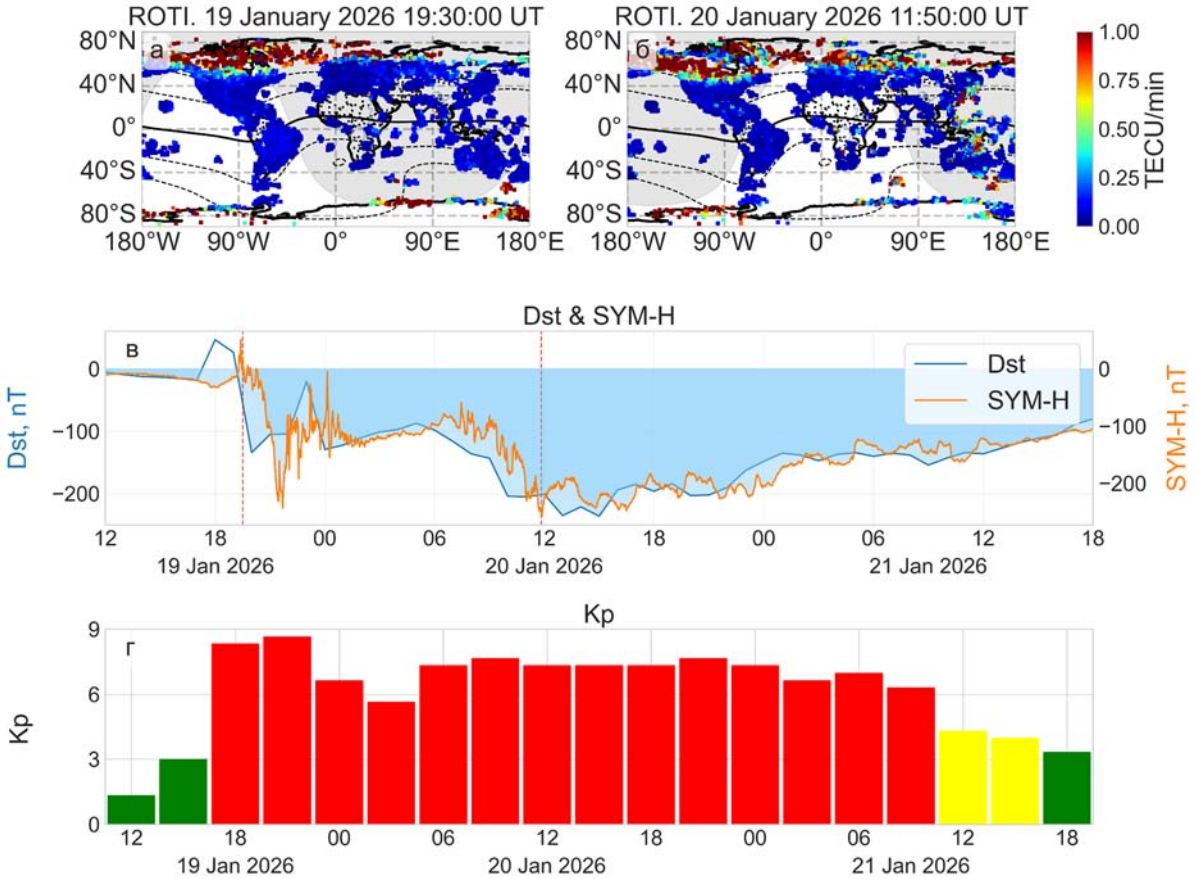

Рис. 2. Карты индекса ROTI 19 января 2026 г. 19:30 UT (а) и 20 января 2026 г. 06:30 UT (б), а также вариации геомагнитных индексов Dst и SYM-H (в) и индекса Kp (г) за период 19–20 января 2026 г. Вертикальными красными штриховыми линиями на панели (в) отмечены моменты построения карт ROTI. Серой заливкой на картах ROTI показана неосвещенная сторона, черными линиями – геомагнитный экватор и геомагнитные параллели.

19 января в 19:30 UT повышенные значения ROTI (Рис. 2а) сосредоточены преимущественно в высоких широтах Северного полушария и превышают типичные значения, регистрируемые для спокойных условий. Это указывает на усиление ионосферных неоднородностей в авроральных областях. Данное распределение соответствует началу активной фазы бури: индекс Kp (рис. 2г) достиг 8+, а индексы Dst и SYM-H быстро снижаются (Рис. 2в). Такое сочетание признаков показывает, что усиление геомагнитной активности сопровождается ростом неоднородности ионосферы.

К 11:50 UT 20 января возмущения достигают своего пика (Рис. 2б). Наиболее заметные области повышенного ROTI остаются в высоких широтах, что связано с продолжением поступления энергии солнечного ветра в высокоширотную область в главную фазу бури.

Два момента времени, выбранные для построения карт ROTI, соответствуют разным фазам бури. Первая карта (Рис. 2а) показывает ионосферный отклик в начале главной фазы, а вторая – вблизи наиболее сильного развития кольцевого тока (глубокого минимума Dst и SYM-H). Используя такое представление мы можем увидеть, что смещение границы овала сильнее связано с индексом Dst/SYM-H, индекс Kp-менее информативен для оценки динамики границы. Таким образом, например, для задачи построения модели положения овала от состояния магнитосферы эффективнее использовать Dst/SYM-H, чем Kp.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена система анализа геомагнитных бурь и ионосферных возмущений с использованием разнородных данных космической погоды. Разработанный инструмент обеспечивает последовательную загрузку, синхронизацию, подготовку к визуализации и построение графических представлений данных, получаемых из OMNI, SIMuRG, NMDB, GIRO, Aurorasaurus, GFZ и WDC Kyoto.

Использование единой среды анализа позволяет совместно рассматривать параметры солнечного ветра, геомагнитные индексы, характеристики ионосферы, данные космических лучей и наблюдения полярных сияний. Такой подход упрощает сопоставление временных и пространственных характеристик возмущений и позволяет анализировать отклик ионосферы на разных фазах геомагнитной бури.

На примере геомагнитной бури 19-21 января 2026 г. показано, что совмещение карт ROTI с временными рядами индексов Dst, SYM-H и Kp позволяет связать усиление геомагнитной активности с развитием ионосферных неоднородностей в высокоширотной области. Графические представления дают возможность сопоставлять разные фазы события и проводить интерпретацию взаимосвязи в системе солнечный ветер — магнитосфера — атмосфера — ионосфера. Продемонстрирован пример гипотезы, ее проверка, выводы и пример использования разработанного инструмента для планирования будущей работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Автор выражает благодарность организациям, предоставившим данные межпланетной среды, геомагнитных индексов, ионосферных параметров и наблюдений полярных сияний, использованные в работе. Автор также благодарит Ю.В. Ясюкевича и А.М. Веснина за кураторство, а Е.И. Данильчук – за демонстрацию подходов к построению графиков, пригодных для научных публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Reinisch B.W., Galkin I.A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) // Earth Planet Sp. 2011. V. 63. P. 377–381. DOI: 10.5047/eps.2011.03.001

Kosar B.C., MacDonald E.A., Case N.A., Heavner M. Aurorasaurus database of real-time, crowd-sourced aurora data for space weather research // Earth and Space Science. 2018. V. 5, N 12. P. 970–980. DOI: 10.1029/2018EA000454.

Matzka J., Bronkalla O., Tornow K., Elger K., Stolle C. Geomagnetic Kp index. V. 1.0 // GFZ Data Services. 2021. DOI: 10.5880/Kp.0001.

Papitashvili N.E., King J.H. OMNI Hourly Data Set [Data set] // Space Physics Data Facility. 2020. DOI: 10.48322/1shr-ht18.

Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D. et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS // Advances in Space Research. 2015. V. 55, N 12. P. 2745–2807. DOI: 10.1016/j.asr.2015.03.023.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Nose M., Iyemori T., Sugiura M., Kamei T. Geomagnetic Dst index // WDC for Geomagnetism, Kyoto. 2015. DOI: 10.17593/14515-74000.

Yasyukevich Y., Danilchuk E., Beletsky A., Borvenko E., Chernyshov A., Fainshtein V., Ivanova V., Khabituev D., Kravtsova M., Oinats A., Olemskoy S., Padokhin A., Ratovsky K., Sdobnov V., Vesnin A., Yasyukevich A., Yazev S. The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm // Sensors. 2026. V. 26, N 5. Art. 1490. DOI: 10.3390/s26051490.

Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V. et al. SIMuRG: system for ionosphere monitoring and research from GNSS // GPS Solutions. 2020. V. 24. Art. 69. DOI: 10.1007/s10291-020-00983-2.

URL: https://www.nmdb.eu (дата обращения: 02.06.2026).