



УДК 550.386.6

РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И АЛГОРИТМА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

А. Д. Шклярук¹, Д. А. Арутюнян¹, А. А. Брагина¹¹Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

В статье рассматривается разработка региональных индексов геомагнитной активности и алгоритма краткосрочного прогноза геомагнитной обстановки для территории Российской Федерации. Анализируются проблемы использования зарубежных данных при моделировании геомагнитных параметров и риски получения неточных результатов при нынешнем состоянии российской сети магнитных обсерваторий. Описываются процессы группировки наблюдательных пунктов по регионам России и модернизации алгоритмов расчета индекса K_p с учетом данных отечественных обсерваторий сети INTERMAGNET. Разработаны три региональных индекса геомагнитной активности: K_{Rus_C} для центральной части РФ, K_{Rus_S} для Урала и Сибири, K_{Rus_V} для Дальнего Востока. Рассматриваются преимущества краткосрочных (до 1 суток) прогнозов геомагнитной активности для различных отраслей, включая спутниковую связь, энергетику, космические миссии, авиацию и здравоохранение. Также подчеркивается значимость таких прогнозов для научных исследований, направленных на изучение процессов на Солнце и их влияния на Землю. В исследовании представлен алгоритм краткосрочного прогнозирования (до 1 суток) вариаций магнитного поля, основанный на методе SARIMAX, которая учитывает временные и сезонные зависимости, а также внешние факторы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ, СЕТЬ INTERMAGNET, КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, ИНДЕКС K_p , СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, МАГНИТНЫЕ БУРИ, SARIMAX

EDN: AHJCAT

1. ВВЕДЕНИЕ

Индекс K_p определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых на 13 отобранных магнитных обсерваториях (рис. 1), расположенных в субавроральной зоне между 48° и 63° градусами северной и южной геомагнитных широт [Bartels et al., 1939].

С развитием современных технологий измерений и обработки информации становится актуальной задача локализации получаемых индексов магнитной активности с повышением точности аппроксимации в пределах отдельных территорий. Появляется необходимость более точного прогнозирования и анализа геомагнитной обстановки непосредственно для территорий Российской Федерации.

K_p -индекс может использоваться как прямой монитор силы магнитосферной конвекции. Он применяется при расчёте вариаций плотности атмосферы, что очень важно для оценки торможения

Электронная почта авторов для переписки:

Шклярук Алексей Дмитриевич, e-mail: shklyaruk@ipg.geospace.ru
Арутюнян Давид Артурович, e-mail: david-20.97@mail.ru
Брагина Анастасия Андреевна, e-mail: bragina@ipg.geospace.ru<https://elibrary.ru/ahjcat>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

спутников, при вычислении положения магнитопаузы и для моделей аврорального высыпания электронов внешнего радиационного пояса Земли, а также для изучения и прогнозирования распространения высокочастотных радиосигналов в ионосфере. В настоящее время при моделировании указанных параметров используются зарубежные данные.

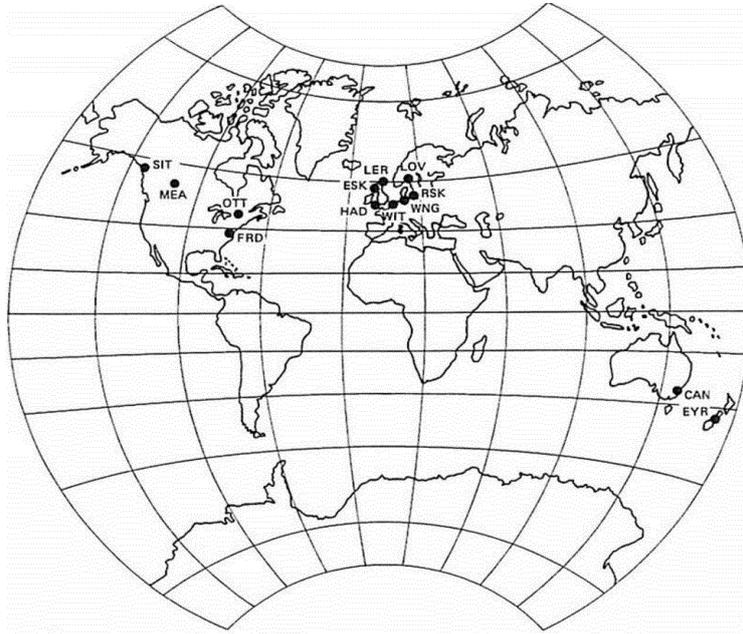


Рис. 1. Положение 13 отобранных обсерваторий сети INTERMAGNET
[URL: <https://intermagnet.org/metadata/#/map>]

Для получения локализованных индексов геомагнитной активности на территории РФ, произведено группирование наблюдательных магнитовариационных пунктов по регионам РФ: Центральный, Урал/Сибирь и Дальний восток. Карта с группированием станций представлена на рисунке 2. В группу Центральной России попали станции SPG (Санкт-Петербург) и BOX (Москва), Урал/Сибирь — ARS (Екатеринбург), NVS (Новосибирск) и IRT (Иркутск), Дальний восток — YAK (Якутск), KHB (Хабаровск), MGD (Магадан) и PET (Петропавловск-Камчатский).

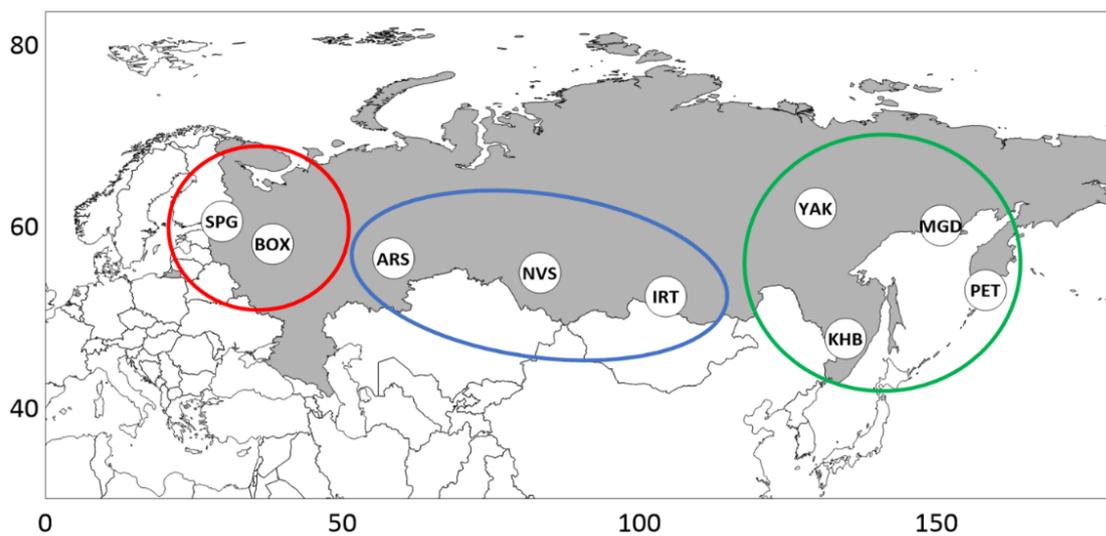


Рис. 2. Группирование наблюдательной магнитовариационной сети РФ.
SPG (Санкт-Петербург), BOX (Москва), ARS (Екатеринбург), NVS (Новосибирск), IRT (Иркутск), YAK (Якутск), KHB (Хабаровск), MGD (Магадан), PET (Петропавловск-Камчатский)

2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Алгоритмы расчета индексов геомагнитной активности K_p в общих чертах описаны организациями, которые выдают данный параметр — Потсдамский центр имени Гельмгольца и Всемирный центр данных по геомагнетизму в Киото соответственно.

С целью создания отечественных региональных индексов геомагнитной активности необходимо проводить модернизацию алгоритмов расчета.

В 2023 году авторами статьи разработан алгоритм расчета индекса магнитной активности [Шклярчук и др., 2024]. В данной статье представлена модернизация алгоритма и программы расчёта K_p -индекса с фокусом на использование данных с отечественных обсерваторий сети INTERMAGNET (рис. 2).

Схема работы программы представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Схема работы программы для расчета K_p -индекса

Первым делом для каждой станции необходимо провести оценку и расчёт нормировочных коэффициентов амплитуд граничных значений K -индекса, которые возрастают по логарифмической шкале от 0 до 9. Для этого необходимо определить амплитуду граничного значения для $K=9$.

На вход программы подаётся информация с российского сегмента сети обсерваторий INTERMAGNET в формате IAGA-2002. Рассмотрим процесс поиска амплитуды граничного значения для $K=9$ на примере станции MGD (Магадан).

Определение амплитуды граничного значения для $K=9$ сводится к решению обратной задачи. Значения устанавливаются от 300 до 1000 нТл с шагом в 100 нТл и производится расчёт индексов геомагнитной активности (рис. 4) с последующей оценкой по приведённой метрике (корреляция и среднеквадратичное отклонение) (рис. 5).

Согласно полученным оценкам, выбирается амплитуда предельного значения для $K = 9$ по критерию максимизации коэффициента корреляции и минимизации среднеквадратического отклонения. Так на примере обсерватории MGD (Магадан) выбрана амплитуда предельного значения для $K = 9$ — 900 нТл.

Таким образом, график оценок K -индекса геомагнитной активности с выбранной амплитудой предельного значения выглядит следующим образом — рисунок 6.

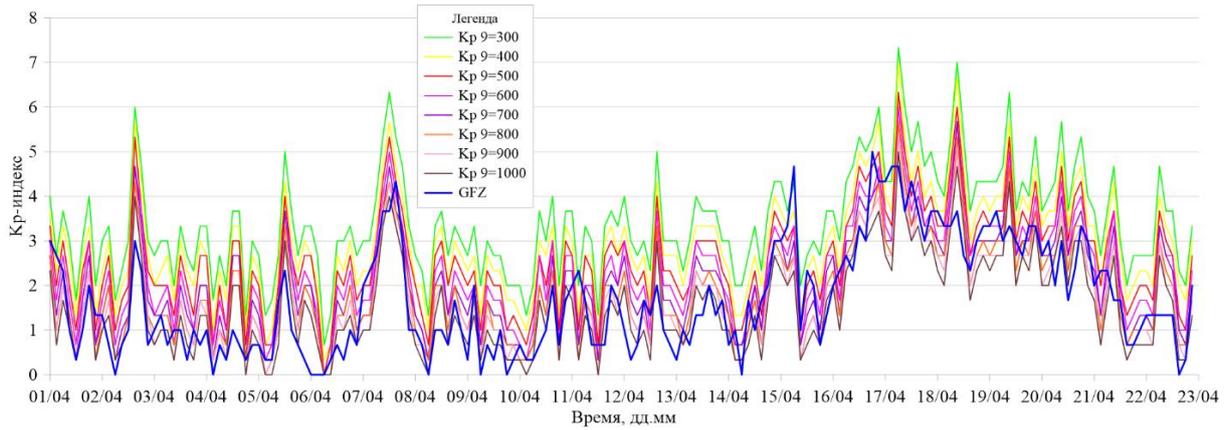


Рис. 4. Сопоставление оценок К-индекса по данным обсерватории MGD (Магадан) с эталонными значениями Кр-индекса для различных амплитуд предельных значений для $K=9$

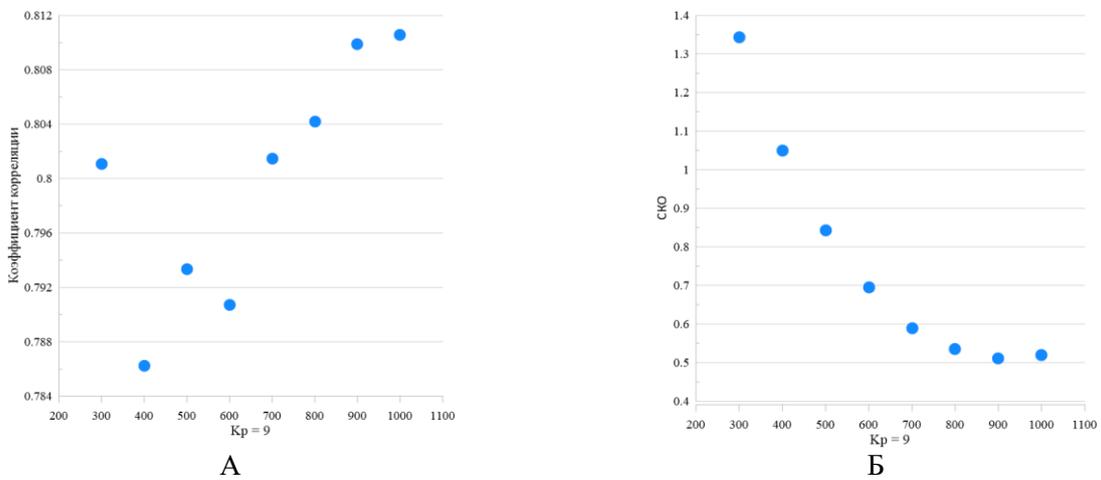


Рис. 5. Кросс-плот распределения коэффициентов линейной корреляции и среднеквадратического отклонения Пирсона оценок К-индекса по данным обсерватории MGD (Магадан) с эталонными значениями Кр-индекса для амплитуд предельных значений для $K=9$ от 300 до 1000 с шагом в 100 нТл

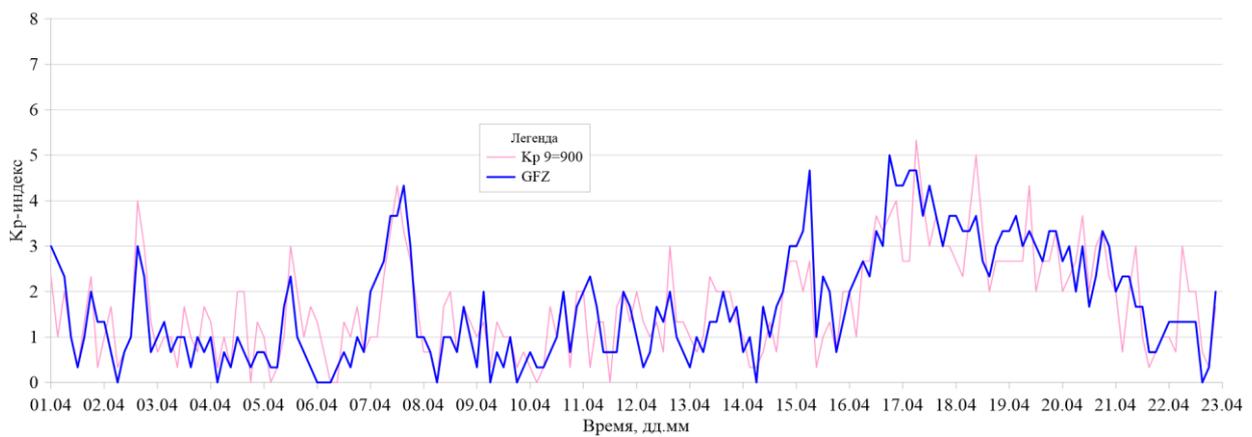


Рис. 6. Графики трёхчасовых Кр индексов геомагнитной активности по данным GFZ (синий) и по результатам оценки по данным обсерватории MGD с амплитудой предельного значения для $K=9$ — 900 нТл (розовый)

Аналогичным образом получены предельные значения для всех обсерваторий российского сегмента сети INTERMAGNET (табл. 1).

Таблица 1. Обсерватории на территории Российской Федерации

№	IAGA	Город	Широта	Долгота	K=9 (нТл)
1	SPG	Санкт-Петербург	60° 32'	29° 43'	800
2	BOX	Москва	58° 4'	38° 13'	700
3	ARS	Архангельск	56° 26'	58° 34'	700
4	NVS	Новосибирск	54° 51'	83° 14'	700
5	IRT	Иркутск	52° 16'	104° 27'	600
6	YAK	Якутск	61° 57'	129° 39'	900
7	MGD	Магадан	60° 3'	150° 44'	900
8	PET	Петропавловск- Камчатский	52° 58'	158° 15'	600
9	KHB	Хабаровск	47° 36'	134° 41'	600

Полученные расхождения (рис. 6) обусловлены геомагнитными эффектами, локализованными в окрестностях установок обсерваторий. Повышение точности оценки достигается осреднением большего количества значений K-индексов, полученных на различных обсерваториях.

3. РАСЧЕТ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

В рамках работы разработано 3 региональных индекса геомагнитной активности: K_{Rus_C} , K_{Rus_S} и K_{Rus_V} — индексы магнитной активности, рассчитанные для территорий центральной части РФ, Урала и Сибири и территории Дальнего Востока РФ соответственно.

Для расчета K_{Rus_C} -индекса используются 2 станции: SPG (Санкт-Петербург) и BOX (Москва); для K_{Rus_S} -индекса — 3 станции: ARS (Екатеринбург), NVS (Новосибирск) IRT (Иркутск); для K_{Rus_V} -индекса — 4 станции: YAK (Якутск), MGD (Магадан), PET (Петропавловск-Камчатский), KHB (Хабаровск) (рис. 2).

Каждый индекс рассчитан за период 2021 года по алгоритму, описанному выше. Для каждого региона считается среднее значение по K-индексам всех станций, входящих в регион расчета. Результат расчетов для всех выделенных регионов за ноябрь 2021 года представлен на рисунке 7. Также на график нанесён планетарный индекс GFZ для сравнения. Индексы геомагнитной активности изменяются за ноябрь от 0 до 7.67. Расхождения между графиками индексов могут быть связаны с локальным геологическим строением территории на которой находится магнитовариационная станция и различным откликом локального магнитного поля на геомагнитное возмущение. С помощью данных индексов можно улучшить точность прогноза геомагнитной активности для заданного региона. Однако стоит отметить, что для получения наиболее достоверных значений региональных индексов, необходимо установить дополнительные магнитовариационные станции по всей России.

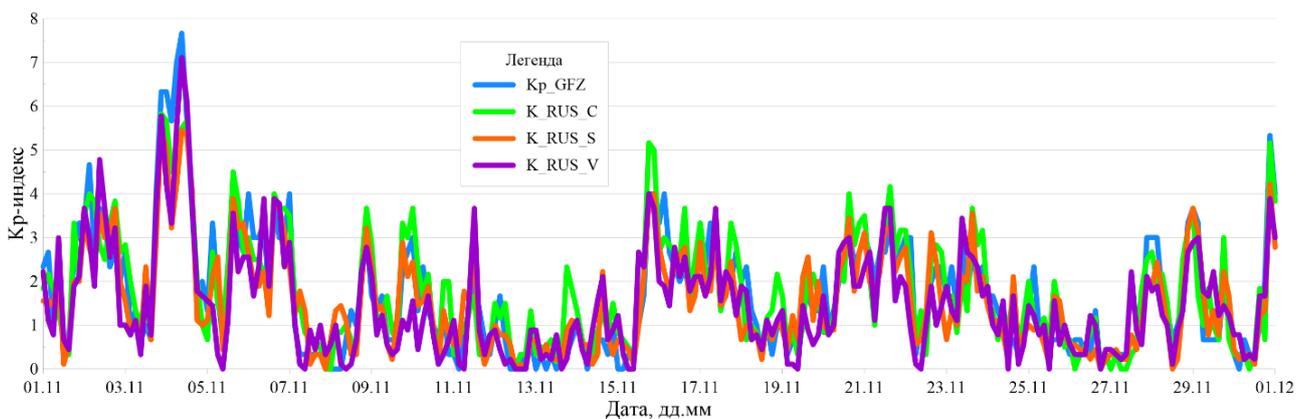


Рис. 7. Сравнение региональных индексов геомагнитной активности

4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Краткосрочные прогнозы геомагнитной активности важны для мониторинга состояния магнитного поля Земли и предотвращения негативных последствий, вызванных изменениями солнечной активности.

Геомагнитная активность влияет на многие аспекты жизни и работы человека, особенно те, которые зависят от технологий и космических исследований. Поэтому точные и своевременные прогнозы позволяют заранее оценить возможные риски и предпринять необходимые меры для защиты систем и обеспечения безопасности жизнедеятельности человека.

Вот несколько ключевых областей, где такие прогнозы оказываются наиболее полезными:

1. Воздействие на спутниковую связь: магнитные бури могут нарушать работу спутниковых систем связи, навигации (например, ГЛОНАСС), а также вызывать сбои в радиосвязи. Прогноз позволяет операторам связи заранее принять меры для минимизации этих эффектов;
2. Энергетические системы: геомагнитная активность может влиять на электрические сети, вызывая перегрузки и даже аварии. Энергетическим компаниям важно знать о возможных возмущениях, чтобы предотвратить повреждения оборудования и обеспечить стабильную подачу электроэнергии;
3. Космические миссии: космонавты и оборудование на Международной космической станции (МКС) подвержены риску радиационного воздействия при сильных магнитных бурях. Краткосрочные прогнозы позволяют планировать безопасные условия работы и принимать защитные меры;
4. Авиация: пилоты и диспетчеры нуждаются в информации о состоянии магнитосферы Земли, так как сильные солнечные выбросы могут повлиять на высокоширотные маршруты полетов, нарушая радиосвязь и создавая риск для пассажиров и экипажа.

В рамках исследования разработан краткосрочный прогноз (до 1 суток) вариаций магнитного поля, основанный на анализе данных предыдущих дней. Данный алгоритм опирается исключительно на данные, полученные с одной магнитовариационной станции, анализируя изменения вариаций за 5 дней и прогнозируя их на 1 день вперед.

Для прогноза использовался метод SARIMAX (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with eXogenous regressors) [Korstanje, 2021], который является расширением классической модели ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) и позволяет учитывать сезонность и внешние факторы. Алгоритм реализован в среде программирования Python с помощью библиотеки statsmodels.

Метод SARIMAX включает в себя несколько параметров:

1. AR(p) — авторегрессия порядка p. Эта часть учитывает зависимость текущего значения временного ряда от предыдущих значений.
2. I(d) — интегрирование порядка d. Здесь производится разностная операция для устранения тренда и стационарности ряда.
3. MA(q) — скользящее среднее порядка q. Этот компонент учитывает влияние случайных ошибок прошлых периодов.
4. SAR(P) — сезонная авторегрессионная компонента порядка P. Она учитывает сезонные эффекты, которые повторяются через определённые интервалы времени.
5. SI(D) — интегрирующая сезонная компонента. Она устраняет сезонный тренд.
6. SMA(Q) — сезонное скользящее среднее. Оно добавляет влияние ошибок в предыдущие сезоны.
7. eXogenous Regressors (X) — внешние регрессоры. Они включают дополнительные переменные, которые могут оказывать влияние на временной ряд.

Метод SARIMAX используется для прогнозирования временных рядов, когда необходимо учитывать как временные зависимости внутри самого ряда, так и влияние внешних факторов.

Для тестирования работы алгоритма использовалась амплитуда вариаций полного вектора магнитного поля со станции ВОР (Москва). На вход программе подаются данные в формате IAGA-2002 за 5 дней (рис. 8).

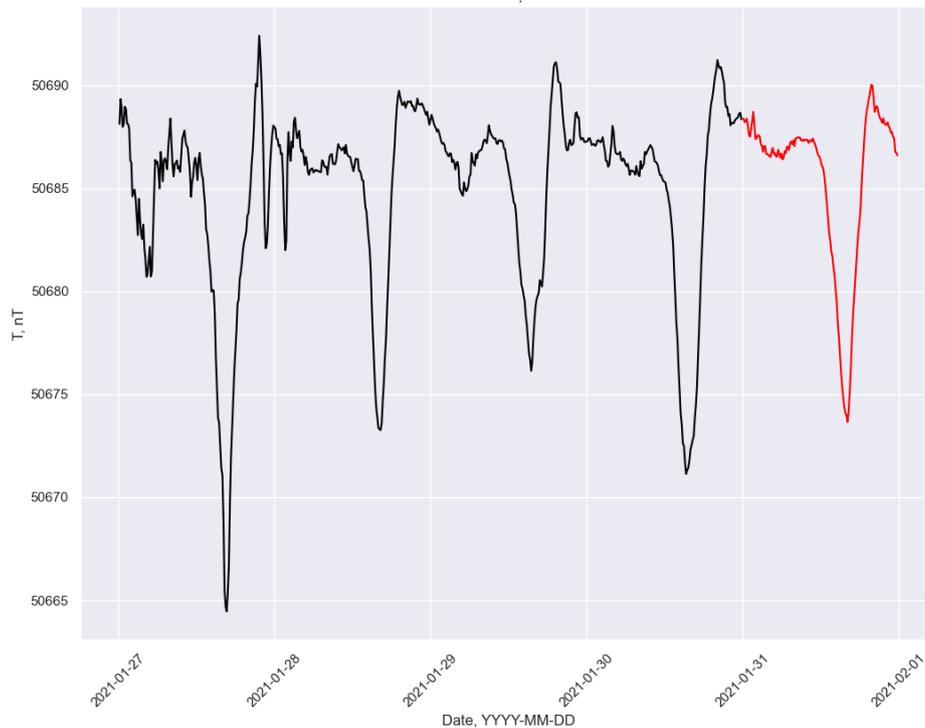


Рис. 8. Данные вариаций магнитного поля за 5 дней

Для тестирования и дальнейшего прогноза выделяется последний день (см. рис. 8 — красным цветом). Результат прогноза показан на рисунке 9 зелёным цветом. Среднеквадратическое отклонение между данными составляет менее 0.1 нТл. Алгоритм хорошо справляется с задачей прогноза вариаций для спокойного дня, однако, стоит предположить, что, в виду отсутствия в алгоритме данных о возмущениях на Солнце, которые порождают собой геомагнитные возмущения на Земле, он не сможет предсказывать изменения амплитуды вариаций, связанных с геомагнитными бурями. Чтобы алгоритм мог прогнозировать геомагнитные бури, необходимо улучшать модель и добавлять в обучающую выборку дополнительные параметры, например, скорость солнечного ветра и число Вольфа.

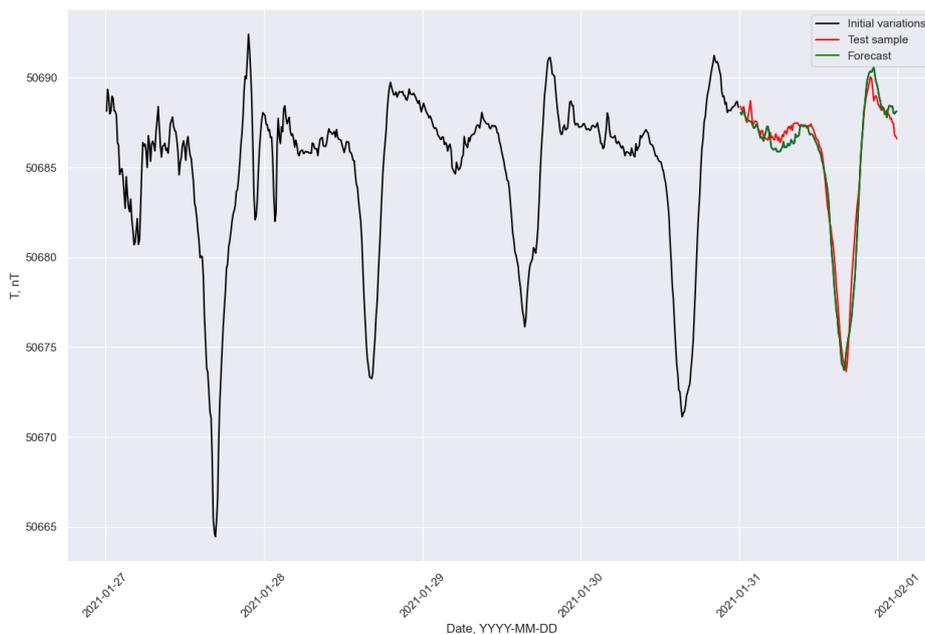


Рис. 10. Результат работы алгоритма краткосрочного прогноза вариаций магнитного поля (зеленый цвет) и реальные данные (черный и красный цвет)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы разработан алгоритм расчета региональных K-индексов магнитной активности. Разработан алгоритм краткосрочного прогноза вариаций магнитного поля.

Применение предложенных методик позволит повысить эффективность мониторинга состояния магнитного поля Земли и уменьшить риски, вызванных изменениями солнечной активности.

Отмечено, что для получения наиболее достоверных значений региональных индексов, необходимо установить дополнительные магнитовариационные станции по территории всей России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета 2020–2024 гг. (тема 6.1).
Регистрационный номер АААА-А20-1200112390082-9

ЛИТЕРАТУРА

- *Bartels J., Heck N. H., Johnston H. F.* The three-hour-range index measuring geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. 1939. 411-454 pp.
- INTERMAGNET [Электронный ресурс] URL: <https://www.intermagnet.org/>
- *Шклярук А.Д., Арутюнян Д.А., Брагина А.А.* Программа расчета планетарных и региональных индексов геомагнитной активности с вариативным выбором обсерваторий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619127 от 19.04.2024 г. 2024.
- *Korstanje J.* The SARIMAX Model. In: *Advanced Forecasting with Python*. Apress, Berkeley, CA. 2021.

DEVELOPMENT OF REGIONAL GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES AND AN ALGORITHM FOR SHORT-TERM FORECASTING OF THE GEOMAGNETIC SITUATION

Shklyaruk A. D., Arutyunyan D. A., Bragina A. A.

The article discusses the development of regional geomagnetic activity indices and an algorithm for short-term forecasting of the geomagnetic situation in the territory of the Russian Federation. The problems associated with using foreign data when modeling geomagnetic parameters are analyzed, as well as the risks of obtaining inaccurate results given the current state of Russia's network of magnetic observatories. The processes of grouping observation points by regions of Russia and modernizing algorithms for calculating the K_p index based on data from domestic observatories within the INTERMAGNET network are described. Three regional geomagnetic activity indices have been developed: K_{Rus_C} for the central part of the Russian Federation, K_{Rus_S} for the Urals and Siberia, and K_{Rus_V} for the Far East. The advantages of short-term forecasts (up to 1 day) of geomagnetic activity for various sectors, including satellite communications, energy, space missions, aviation, and healthcare, are considered. The importance of such forecasts for scientific research aimed at studying solar processes and their impact on Earth is also emphasized. The study presents a short-term forecasting algorithm (up to 1 day) for variations in the magnetic field, based on the SARIMAX method, which takes into account temporal and seasonal dependencies, as well as external factors.

KEYWORDS: GEOMAGNETIC ACTIVITY, REGIONAL INDICES, INTERMAGNET NETWORK, SHORT-TERM FORECAST, RUSSIAN FEDERATION, K_p INDEX, SOLAR ACTIVITY, MAGNETIC STORMS, SARIMAX