

УДК 550.385, 550.386.6

## ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МЕРЫ АНОМАЛЬНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. А.А. Ощенко<sup>1</sup>, Р.В. Сидоров<sup>1</sup>, А.А. Соловьев<sup>1,2</sup>, Е.Н. Соловьева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Исследованы возможности применения меры аномальности (МА) в задачах определения периодов повышенной и пониженной геомагнитной активности, а также зависимости средних значений МА от геомагнитной широты во время разных фаз магнитных бурь. Анализ проводился по пяти бурям, относящимся к завершающему этапу 24-го солнечного цикла и зарегистрированным в период 2015–2018 гг. Использовались данные восьми магнитных обсерваторий, расположенных между 40 и 60° с.ш. и 29 и 158° в.д. В целом, средние значения МА не зависят от широты для каждой бури, поскольку алгоритм учитывает региональный режим магнитных вариаций и дает нормализованную оценку. На начальной фазе бури наблюдается незначительное уменьшение средних значений МА с увеличением геомагнитной широты, что обусловлено ослаблением влияния экваториального кольцевого тока. На фазе восстановления средние значения МА, наоборот, слегка возрастают с широтой из-за большего вклада электроджетов полярной ионосферы, возникающих на заключительной стадии бури при приближении к авроральной зоне. Мера аномальности позволяет также распознавать сигнал внезапного начала бури. Показаны преимущества МА по сравнению с традиционной техникой на основе планетарного  $K_p$ -индекса при выборе магнитно-спокойных временных интервалов, что делает возможным применение МА для изучения токовой системы  $Sq$  низкоширотной ионосферы и для отбора исходных данных для построения моделей главного магнитного поля.

**Ключевые слова:** земной магнетизм, магнитная активность, индексы магнитной активности.

### Введение

В последние десятилетия в геофизике и связанных с ней науках стремительно растет объем поступающих данных о процессах в недрах Земли, на ее поверхности и в околоземном пространстве. Постоянно расширяются сети наземных геофизических измерений, повышаются требования к объему регистрируемых данных и увеличивается частота их дискретизации для удовлетворения нужд более широкого круга научных интересов. В наши дни сеть магнитных обсерваторий высочайшего стандарта INTERMAGNET [Love, Chulliat, 2013] включает в себя более 130 действующих обсерваторий по всему миру. Данные, собираемые этими обсерваториями, представляют собой огромный, неуклонно растущий объем информации, едва ли доступный для непрерывной ручной обработки. Кроме того, в последнее время активизировалась оцифровка собранных архивов исторических наблюдений. Таким образом, существенно возросла роль адекватных методов анализа больших объемов цифровых данных.

Для оценки геомагнитной активности на основе наземных наблюдений широко применяются планетарные и региональные индексы [Mayaud, 1980; Rangarajan, 1989; Menvielle, 1990; Siebert, Meyer, 1996], первым из которых был  $C$ -индекс, введенный в 1906 г. [Lincoln, 1967]. Большинство индексов отражают конкретные физические процессы, которые происходят в околоземном пространстве и порождают наблюдаемые на поверхности Земли возмущения. К сожалению, даже сейчас многие индексы позволяют

осуществлять только ретроспективную оценку активности с опозданием на несколько часов. Обычно индексы рассчитываются по данным строго ограниченного числа обсерваторий (менее 20) и предназначены для количественного определения общей интенсивности магнитных бурь, суббурь, их источников и общего уровня активности. Региональный выбор обсерваторий осуществляется в предположении о предопределенном и локализованном географическом распределении рассматриваемых эффектов. При быстром росте объемов данных такой подход оказывается недостаточно эффективным. Вместе с тем, процедура расчета таких индексов, как  $K_p$  и  $D_{st}$ , исключает модификации с целью сохранения однородности в течение нескольких десятилетий. В настоящее время меры, дающие интегральную количественную оценку региональных или глобальных процессов, представляются несколько устаревшими.

Другим несовершенством большинства традиционных индексов является их недостаточное разрешение по времени (обычно 1–3 часа), что иногда маскирует более быстрые, но значительные возмущения. Естественно, что устоявшийся подход к оценке геомагнитной активности постоянно улучшается, чтобы отвечать ряду требований, среди которых более высокое разрешение по времени региональных (см., например, [Della-Rose, Sojka, Zhu, 1999]) и планетарных [Iyemori et al., 2000; Chambodut et al., 2015] индексов, оценка геомагнитной активности в реальном времени [Stankov, Stegen, Warnant, 2011], рост информационной ценности выделяемых сигналов [Mandrikova et al., 2013; Mandrikova, Solovjev, Zalyaev, 2014] и др.

В работе [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016] был предложен новый индикатор оценки геомагнитной активности, основанный на магнитуде меры аномальности (МА) записей магнитометров в заданный момент времени или за временной интервал. Этот индикатор предназначен для автоматизированной оценки уровня геомагнитной активности в окрестностях определенной магнитной обсерватории или в выбранном регионе по данным множества расположенных рядом обсерваторий. Индикатор отображает уровень геомагнитной активности в единой шкале  $[-1, 1]$  независимо от расположения соответствующих обсерваторий и, следовательно, типичных амплитуд возмущений. В некотором смысле мера аномальности является аналогом регионального  $K$ -индекса [Bartels, Heck, Johnson, 1939].

Часто возникает необходимость выбора данных за период пониженной магнитной активности, например, при отборе исходных данных для построения моделей главного магнитного поля Земли, для исследования суточных вариаций магнитного поля и решения других задач. В работе [Соловьев, Смирнов, 2018] авторы воспользовались обратным свойством меры аномальности и применили этот индекс для обнаружения периодов низкой магнитной активности по данным наземных обсерваторий. Были убедительно продемонстрированы преимущества такого подхода перед традиционным, в котором интервалы определяются по значениям индекса  $K_p$ .

В представляемой статье проводится обзор приложений меры аномальности для изучения повышенной и пониженной активностей магнитного поля. В первом случае МА сравнивается с  $K$ -индексом, во втором определяются оптимальные значения меры аномальности для обнаружения магнитно-спокойных дней и возможности последующего исследования  $Sq$ -вариаций. На примере пяти магнитных бурь, зарегистрированных в период 2015–2018 гг., авторами выявляются систематические закономерности при оценке геомагнитной активности с использованием меры аномальности и других индикаторов в составе системы МАГНУС [Gvishiani et al., 2016a]. В статье продемонстрированы характерные особенности широтного распространения геомагнитной активности во время разных фаз бурь.

### Алгоритм расчета меры аномальности (МА)

Разработанная мера аномальности предназначена для оценки геомагнитной активности по записям стационарных наземных наблюдений. Расчет этого индикатора представляет собой модифицированный алгоритм *FCARS (Fuzzy Comparison Algorithm for Recognition of Signals)*, подробно изложенный в работах [Гвишиани, Агаян, Богоутдинов, 2008; Soloviev et al., 2013]. Детальное математическое описание вычисления МА дано в работе [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016]. В настоящем разделе мы приводим эту процедуру в сокращенном виде.

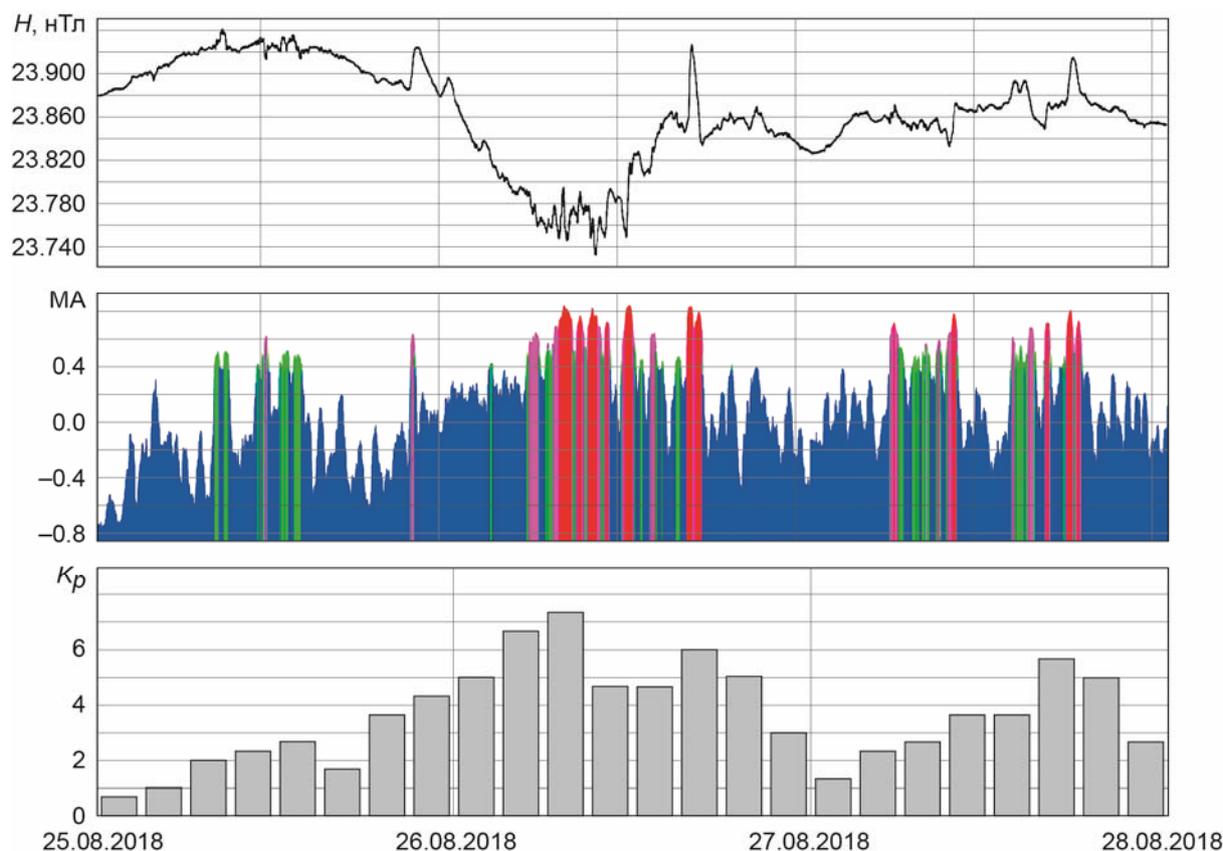
На первом этапе в скользящем временном окне  $\Delta$  по исходным измерениям, определенным на некотором интервале  $T$  (периоде регистрации), вычисляется неотрицательный функционал, называемый выпрямлением. Выбор конструкции выпрямления зависит от решаемой задачи. Авторами используется наиболее универсальное выпрямление “Длина”, представляющее собой сумму модулей конечных разностей первого порядка за  $\Delta$  и определенное на интервале  $T$ . Таким образом, это выпрямление отражает “изрезанность” фрагмента исходного временного ряда, что позволяет обнаружить фрагменты, содержащие как высокочастотные (например, геомагнитные пульсации, сопровождающие магнитные бури и суббури), так и длиннопериодные высокие амплитуды возмущений, которые являются неотъемлемыми составляющими повышенной геомагнитной активности. Выпрямление считается удачно подобранным, если его экстремумы совпадают с искомыми аномалиями исходного ряда. Тесты показали устойчивую эффективность выбранного выпрямления для распознавания экстремальных природных геомагнитных событий в рассматриваемой задаче.

Следующим шагом является выявление как безусловно значительных, так и локализованных небольших возвышенностей выпрямления. Для оценки значительности того или иного значения функции выпрямления относительно его области значений применяются принципы нечёткой логики [Гвишиани и др., 2008]. Результатом является новый временной ряд отображения в пределах  $[-1, 1]$ , который назван мерой аномальности. Это отображение ставит большие значения МА (близкие к 1) в соответствие локальным экстремумам функционала и, следовательно, аномальным измерениям исходной записи, и меньшие значения МА (близкие к  $-1$ ) – в соответствие фоновым измерениям. Результирующий ряд МА имеет ту же дискретизацию области определения, что и исходная запись.

### Применение МА для распознавания пониженной магнитной активности

До 2018 г. МА широко использовалась для обнаружения аномальных сигналов различного происхождения в геофизических временных рядах (см., например, [Gvishiani et al., 2014, 2016a,b; Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016; Agayan et al., 2016]). Согласно [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016] в периоды пониженной магнитной активности мера аномальности не должна превышать значений 0.4–0.5.

В работе [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016] значения МА эмпирически были разделены на четыре категории: фоновые ( $-1 < \text{МА} < 0.4$ ), слабо аномальные ( $0.4 < \text{МА} < 0.55$ ), аномальные ( $0.55 < \text{МА} < 0.7$ ), сильно аномальные ( $0.7 < \text{МА} < 1$ ). Пример использования такой классификации для распознавания разных уровней магнитной активности приведен на рис. 1, где указанные категории меры аномальности отображены разным цветом. Видно, что периоды с повышенными значениями  $K_p$ -индекса, соответствуют аномальным сегментам МА.



**Рис. 1.** Обсерватория “Хабаровск” (КНВ). Оценка геомагнитной активности в период магнитной бури 25–28.08.2018 г.: исходная запись  $H$ -компоненты магнитного поля (*вверху*), значения меры аномальности (*по центру*), значения  $K_p$ -индекса (*внизу*). Здесь и на рис. 2, 3 на графике МА синим цветом обозначены фоновые значения МА, зелёным – слабо аномальные, лиловым – аномальные, красным – сильно аномальные. По горизонтальной оси – календарные даты

**Fig. 1.** Observatory “Khabarovsk” (КНВ). Estimation of geomagnetic activity during a magnetic storm on 25–28.08.2018: initial record of the  $H$ -component of the magnetic field (*above*), anomaly measure values (*center*),  $K_p$ -index values (*below*). Here and in Figs. 2, 3 on the AM (Anomaly Measure) graph, blue are the background AM values, green – weakly anomalous, purple – anomalous, red – strongly anomalous. On horizontal axis – calendar dates

Представленная на рис. 2 магнитограмма получена на обсерватории “Хабаровск” (КНВ) 25.08.2014 г. Этот день считается одним из пяти самых спокойных дней месяца – согласно официальной классификации *AGA* он оценивается значениями планетарного  $K_p$ -индекса 0 и 1. Можно видеть, что на протяжении суток значения меры аномальности практически не превышали 0.4, кроме трёх кратковременных фрагментов. Большое количество аналогичных тестов было проведено по данным других обсерваторий, расположенных на разных широтах. Результаты показали, что при локальной оценке геомагнитной активности с целью выбора данных за период невозмущенного поля порог МА должен быть определен в границах интервала [0.4, 0.5].

Преимущества индекса МА по сравнению с традиционной техникой на основе  $K_p$ -индекса при выявлении магнитно-спокойных временных интервалов продемонстрированы в работе [Соловьев, Смирнов, 2018], авторы которой выбрали планетарные спокойные дни в период 2011–2015 гг. и сравнили свои результаты с десятью самыми “тихими” днями в каждом месяце, отобранными по  $K_p$ -индексу. Оказалось, что выбранные



**Рис. 2.** Обсерватория “Хабаровск” (КНВ). Оценка по МА геомагнитной активности, зарегистрированной 25.08.2014 г. по [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016]: исходная запись  $H$ -компоненты магнитного поля (вверху), значения меры аномальности (внизу)

**Fig. 2.** Observatory “Khabarovsk” (КНВ). AM estimation of the geomagnetic activity recorded on 25.08.2014 according to [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016]: initial record of the  $H$ -component of the magnetic field (above), anomaly measure values (below)

двумя методами дни, соответствовали друг другу за исключением тех дней, когда имели место интенсивные, но короткие (менее 1.5 ч) магнитные возмущения, сравнимые по амплитуде с  $Sq$ . Одним из таких дней является 17.09.2014 г., который по  $K_p$ -индексу признан одним из четырех самых спокойных дней месяца, но в соответствии с МА был классифицирован как магнитно-возмущенный. В течение 880–960 и 1400–1440 мин UT можно было наблюдать увеличение геомагнитной активности с амплитудами, сравнимыми с суточными колебаниями (см. рис. 3 в работе [Соловьев, Смирнов, 2018]). Для  $Sq$ -исследований важно, чтобы такие короткие, но интенсивные возмущения, игнорируемые принятой методологией, были исключены из анализа. Таким образом, применение МА обеспечивает более точную классификацию планетарных спокойных дней.

Точный выбор магнитно-спокойных дней в каждом месяце необходим при выделении и изучении месячных и сезонных  $Sq$ -вариаций трех ортогональных компонент магнитного поля ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Большинство подходов к этой задаче основано на выборе низких значений планетарного  $K_p$ -индекса (см., например, [Bello et al., 2014; Takeda, 2013; Owolabi et al., 2014; Eleto, Rabiu, 2014; Anad et al., 2016; Vichare, Bhaskar, Ramesh, 2016]). Динамические параметры суточной  $Sq$ -вариации за минимум солнечного цикла 23/24 в 2008 г. рассматривались в работе [Soloviev et al., 2019]. Для обнаружения магнитно-спокойных дней на каждой обсерватории использовался алгоритм расчета меры аномальности. Глобальное распространение  $Sq$ -амплитуд трех ортогональных компонент магнитного поля анализировалось по данным 75 обсерваторий INTERMAGNET<sup>1</sup> и 46 станций сети SuperMAG<sup>2</sup>. Исследования показали сильную широтную зависимость амплитуд  $Sq(X)$ , которая аппроксимируется полиномиальной кривой шестого порядка.

<sup>1</sup> <http://intermagnet.org> (дата обращения: 06.03.2020)

<sup>2</sup> <http://supermag.jhuapl.edu/> (дата обращения: 06.03.2020)

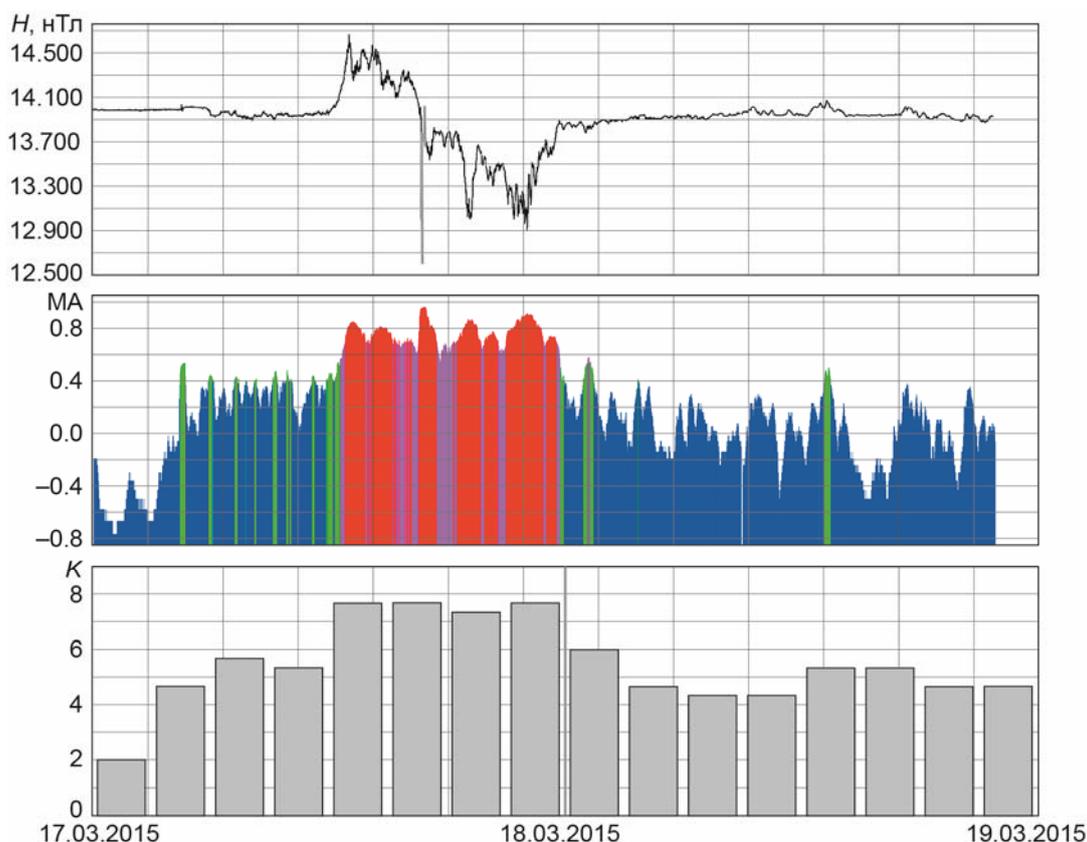
Амплитуды  $Sq(Y)$  также предполагают широтную зависимость, в то время как  $Sq(Z)$  не зависят от широты. По магнитно-спокойным данным, выбранным с применением МА, было продемонстрировано, что в экваториальной области амплитуды  $Sq(X)$  сильно зависят от экваториального электроджета, достигая максимума в периоды равноденствия в регионе Южно-Атлантической магнитной аномалии.  $Sq(Y)$  демонстрирует четкую зависимость от солнечной активности и количества солнечного освещения, достигая больших значений в летнем полушарии и меньших – в зимнем. Эквивалентная токовая система  $Sq$  в  $E$ -слое низкоширотной ионосферы была реконструирована с помощью данных станций и обсерваторий Австралийского материка и узкого европео-африканского широтного сегмента. Была продемонстрирована сильная зависимость токовой системы  $Sq$  от солнечной активности: токовые вихри в зимнем полушарии распадаются, не показывая следов образования токовых петель, в то время как их формирование становится очевидным в летнем полушарии. Таким образом, применение меры аномальности может быть полезно для изучения геомагнитных вариаций ионосферного происхождения.

Предложенный метод обнаружения магнитно-спокойных дней по данным обсерваторских наблюдений имеет широкие потенциальные приложения. К ним среди прочего относятся проверка и усовершенствование существующих моделей главного магнитного поля [Соловьев, Смирнов, 2018], моделирование его быстрых вариаций и корректировка направления буровой колонны при наклонно-направленной бурении скважин в высоких широтах в режиме реального времени при повышенной магнитной активности [Гвишиани, Лукьянова, 2015, 2018].

### Применение МА для распознавания повышенной магнитной активности

При проведении анализа повышенной магнитной активности возможность применения меры аномальности рассматривалась на множестве бурь, в частности, на примере бури 17.03.2015 г. – сильнейшей из наблюдаемых в текущем солнечном цикле. Алгоритм вычисления МА использовался при обработке данных российских обсерваторий, расположенных на разных географических широтах: “Климовская” (KLI, 60.9° с.ш.), “Магадан” (MGD, 60.1° с.ш.), “Москва” (MOS, 55.5° с.ш.), “Новосибирск” (NVS, 54.9° с.ш.), “Паратунка” (PET, 53.0° с.ш.), “Иркутск” (IRT, 52.3° с.ш.) и “Хабаровск” (KHB, 47.6° с.ш.) [Soloviev et al., 2015, 2016a,b, 2017; Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016]. Упомянутая буря сопровождалась хорошо различимым характерным сигналом внезапного начала ( $SC$ ), появившимся на магнитограммах примерно в 04:45 UT [Gvishiani et al., 2016b]. В ряде случаев  $SC$  дает возможность предупреждения сильных магнитных возмущений за несколько часов. На магнитограммах сигнал внезапного начала был успешно распознан МА либо как слабо аномальное, либо как аномальное событие, что продемонстрировано на примере данных обсерватории “Климовская” на рис. 3, где также представлены значения  $K$ -индекса за период бури. Согласно МА, значения, соответствующие  $SC$ , относятся к слабозвозмущенным и хорошо видны на общем фоне.

Отдельное исследование [Bartels, Heck, Johnson, 1939; Menvielle, Berthelier, 1991] было посвящено сравнению меры аномальности со значениями традиционного трехчасового  $K$ -индекса. Предварительно значения МА были усреднены по трехчасовым интервалам и нормализованы по шкале [0, 1]. Первое сравнение проводилось по геомагнитным данным, зарегистрированным в период повышенной геомагнитной активности в январе 2005 г. на среднеширотной обсерватории Шамбон-ля-Форэ (CLF, Франция).



**Рис. 3.** Обсерватория “Климовская” (KLI). Оценка геомагнитной активности и распознавания внезапного начала магнитной бури 17–18.03.2015 г.: исходная запись  $H$ -компоненты магнитного поля (*вверху*, серым отмечены импульсные помехи техногенной природы), значения меры аномальности (*по центру*), значения планетарного  $K$ -индекса (*внизу*). По горизонтальной оси – календарные даты

**Fig. 3.** Observatory “Klimovskaya” (KLI). Estimation of geomagnetic activity and recognition of the magnetic storm sudden commencement on 17–18.03.2015: the initial record of the  $H$ -component of the magnetic field (*above*, the impulse noise of a technogenic nature is marked in gray), the anomaly measure values (*center*), the values of the planetary  $K$ -index (*below*). Horizontal axis – calendar dates

Второе основывалось на месячной записи, полученной на высокоширотной обсерватории Соданкюля (SOD, Финляндия) в течение января 1995 г. [Soloviev, Agayan, Bogoutdinov, 2016]. Сравнение показало сходство двух методов с коэффициентом корреляции Пирсона ( $R$ ) равным 0.90. Причем, несмотря на искусственное трехчасовое усреднение на графике МА демонстрируется большая чувствительность к магнитным возмущениям, чем на графике  $K$ -индекса.

Также было проведено исследование соотношения трехчасовых значений МА и  $K$ -индекса в зависимости от широты и сезона. При оценке широтной изменчивости коэффициента корреляции были рассмотрены данные 13 обсерваторий, расположенных между  $66^\circ$  с.ш. и  $75^\circ$  ю.ш. Для каждой обсерватории МА и  $K$ -индекс сравнивались в период 01–30.04.2006 г., содержащий фазы как повышенной, так и пониженной магнитной активности. Было показано, что значение  $R$  остается квазипостоянным с изменением широты и колеблется между 0.80 и 0.90 при среднем значении 0.86.

### Закономерности в оценке магнитных бурь при помощи МА

Для изучения зависимости МА от геомагнитной широты и оценки устойчивости её работы было проанализировано поведение МА за периоды разных фаз нескольких магнитных бурь, сводная информация о которых приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Сводная информация о рассматриваемых магнитных бурях

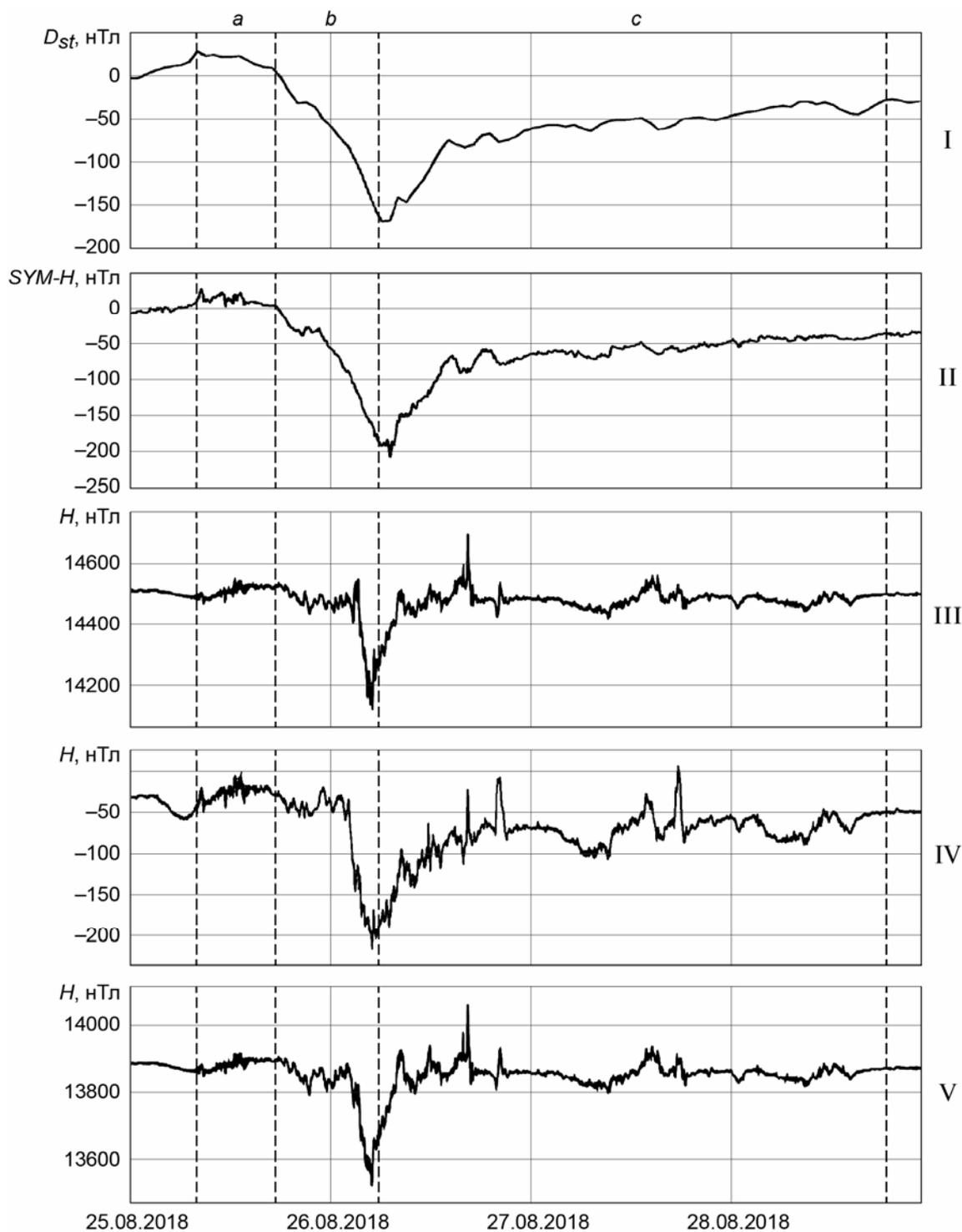
№ бури	Начало фаз магнитной бури (UT)			Конец магнитной бури (UT)	Минимум $D_{st}$ -индекса, нТл
	Начальная	Главная	Восстановительная		
1	17.03.2015, 04:45	17.03.2015, 08:00	17.03.2015, 23:00	21.03.2015, 21:00	-223
2	06.03.2016, 13:30	06.03.2016, 17:00	06.03.2016, 21:30	08.03.2016, 08:30	-98
3	12.10.2016, 21:30	13.10.2016, 08:00	13.10.2016, 17:30	14.10.2016, 14:30	-104
4	12.09.2017, 20:00	12.09.2017, 21:30	13.09.2017, 00:30	13.09.2017, 09:30	-50
5	25.08.2018, 08:30	25.08.2018, 20:00	26.08.2018, 06:30	28.08.2018, 18:30	-174

Выбранные бури относятся к завершающей фазе текущего 24-го солнечного цикла (2008–2020 гг.). Конец цикла характеризуется наиболее мощными солнечными вспышками и наиболее интенсивными проявлениями космической погоды, что связано с ослаблением дипольной составляющей магнитного поля Солнца. Выборка была составлена таким образом, чтобы обеспечить наибольшую репрезентативность рассматриваемых событий различной интенсивности. Были отобраны как самые интенсивные (например, рассмотренная ранее буря 17–18.03.2015 г.), так и менее интенсивные события, но связанные с крупными корональными выбросами массы (например, в период 12–13.09.2017 г.). Для чистоты эксперимента все перечисленные бури имеют классическую морфологию с четко разделяемыми фазами.

В представляемой работе исследовалось, как проявляется активность разных фаз магнитных бурь по разным индексам и в зависимости от геомагнитной широты. Магнитные бури имеют три фазы: начальную, главную и восстановительную [Gonzalez et al., 1994], которые выделяются по  $D_{st}$ -индексу. Временные границы фаз бурь, перечисленных в табл. 1, определялись по данным одночасового  $D_{st}$ -индекса.

В тех случаях, когда временного разрешения  $D_{st}$ -индекса было недостаточно для точного выделения начала бури, использовался одноминутный  $SYM-H$ -индекс. Он относится к группе глобальных индексов геомагнитной активности, разработанных для изучения геомагнитных возмущений в средних широтах с высоким временным разрешением – индексов долготно-симметричных ( $SYM$ ) и асимметричных ( $ASY$ ) возмущений [Iyemori et al., 2000]. Данные индексы рассчитываются по одноминутным значениям компонент  $H$  и  $D$ , соответственно, в направлении магнитного меридиана ( $SYM-H$ ,  $ASY-H$ ) и в направлении восток–запад ( $SYM-D$ ,  $ASY-D$ ). При этом  $SYM-H$ -индекс рассчитывается по другим магнитным обсерваториям и иным образом, нежели  $D_{st}$ -индекс, однако в физическом смысле один аналогичен другому и характеризует поведение симметричного кольцевого экваториального тока. Разбивка магнитной бури на фазы продемонстрирована на примере бури 25–28.08.2018 г. на рис. 4.

Начальная фаза бури характеризуется увеличением  $D_{st}$ -индекса на 20–50 нТл за десятки минут. Однако не все магнитные бури имеют начальную фазу и не все внезапные увеличения  $D_{st}$ -индекса сопровождаются магнитной бурей. Главная фаза магнитной бури определяется по  $D_{st}$ -индексу, уменьшающемуся до значений, меньших –50 нТл. Для выбранных бурь минимум  $D_{st}$ -индекса находился в диапазоне от –50 до –223 нТл (см. табл. 1). Продолжительность главной фазы составляла 1.5–8 часов.



**Рис. 4.** Разбивка магнитной бури 25–28.08.2018 г. на фазы: начальную (a), главную (b), восстановительную (c) по значениям индексов  $D_{st}$  (I) и  $SYM-H$  (II) на примере записей  $H$ -компонент обсерваторий “Санкт-Петербург” (SPG, III), “Арти” (ARS, IV), “Климовская” (KLI, V). По горизонтальной оси – календарные даты. Вертикальные штриховые прямые – границы фаз

**Fig. 4.** Breakdown of the magnetic storm on 25–28.08.2018 into phases: (a) initial, (b) main, (c) recovery based on the values of  $D_{st}$  (I) and  $SYM-H$  (II) indices on the example of  $H$ -component records of observatories “Saint Petersburg” (SPG, III), “Arti” (ARS, IV), “Klimovskaya” (KLI, V). The horizontal axis is calendar dates. Vertical dashed lines – phase boundaries

В период фазы восстановления  $D_{st}$ -индекс увеличивался до значений, свойственных спокойной невозмущенной обстановке. Это определяло конец фазы восстановления и, соответственно, окончание всей магнитной бури. В некоторых исследованиях, например, в работе [Loewe, Pröls, 1997] пороговым значением  $D_{st}$ -индекса, фиксирующим окончание бури, считают величину  $-30$  нТл и следуют правилу, согласно которому магнитной буре соответствует любой период времени, в течение которого  $D_{st}$ -индекс не превышает  $-30$  нТл и при этом падает ниже  $-50$  нТл. Однако данное правило не позволяет уверенно выделить момент начальной фазы, в течение которой  $D_{st}$ -индекс может быть больше указанного порога. Фазы восстановления рассматриваемых бурь длились от 16 до 60 ч.

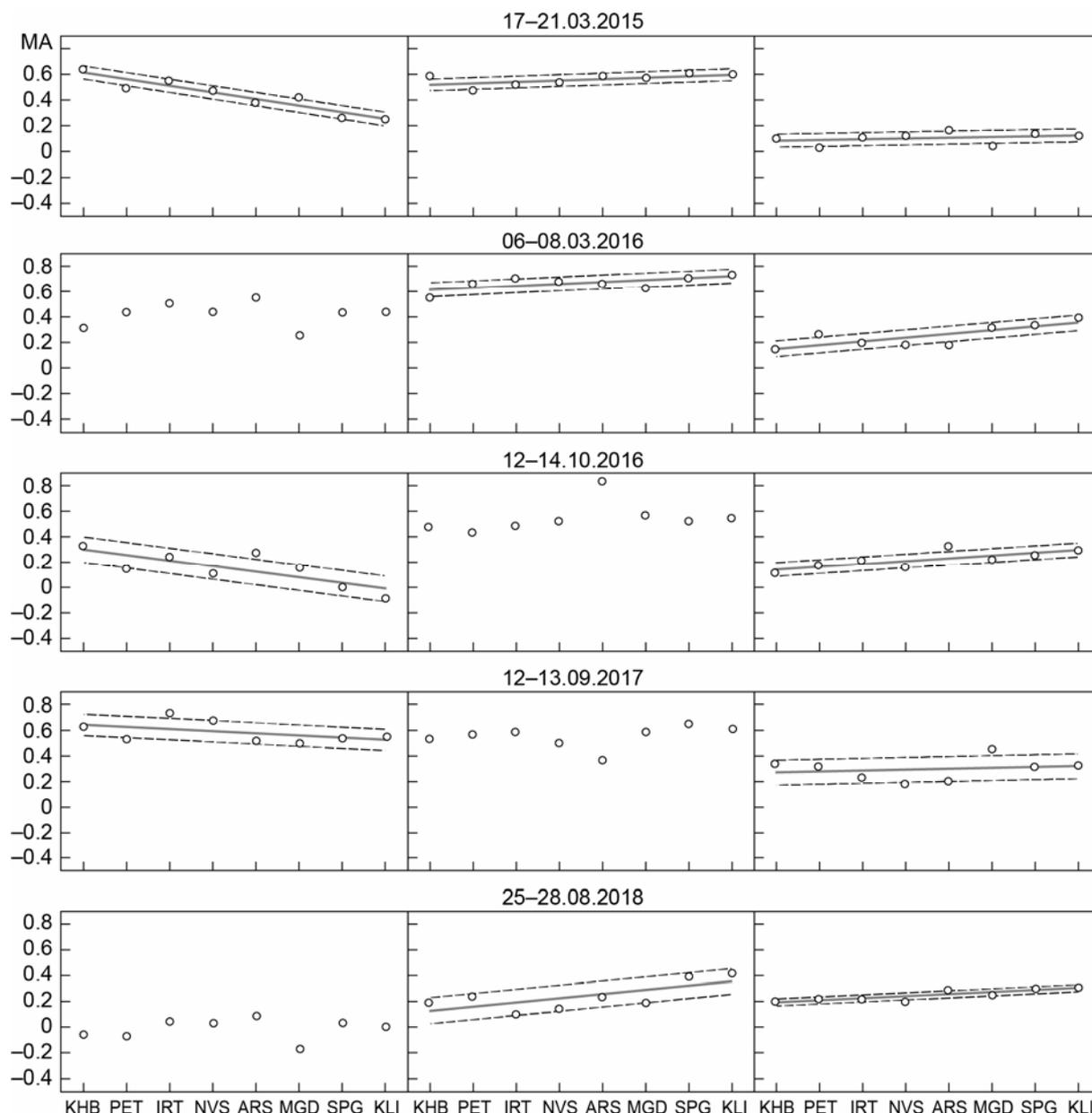
Для максимального широтного охвата были отобраны обсерватории от относительно высокоширотных (KLI, северная геомагнитная широта  $57.3^\circ$ ) до относительно низкоширотных (КНВ, северная геомагнитная широта  $41.6^\circ$ ) [Geomagnetic data... 2015, 2016]. В данных высокоширотных обсерваторий заметнее выражен вклад авроральных электроджетов, протекающих в зоне Хэвисайда ионосферы, тогда как в данных низкоширотных обсерваторий сильнее проявляется вклад экваториальной кольцевой токовой системы  $D_{st}$ . Магнитные обсерватории, данные которых представлены в выборке, упорядочены по геомагнитной широте и собраны в табл. 2.

**Таблица 2.** Географические и геомагнитные (усредненные) координаты рассматриваемых магнитных обсерваторий

Код	Название	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		$\varphi$	$\lambda$	$\varphi_m$	$\lambda_m$
KLI	Климовская	60.85	39.51	57.267	114.825
SPG	Санкт-Петербург	60.542	29.716	56.971	105.957
MGD	Магадан	60.05	150.73	54.241	-138.844
ARS	Аркти	56.433	58.567	52.866	132.135
NVS	Новосибирск	54.85	83.24	51.190	156.920
IRT	Иркутск	52.17	104.46	47.934	178.746
PET	Паратунка	52.97	158.25	46.683	-131.544
КНВ	Хабаровск	47.61	134.69	41.596	-151.459

В анализе использовались записи либо северной ( $X$ ), либо горизонтальной ( $H$ ) компонент полного вектора магнитного поля (в зависимости от того, как ориентирован векторный магнитометр на обсерватории – по географическому или магнитному Северному полюсу). Требуют отдельного изучения электродинамические процессы в области аврорального овала, на его границе и вблизи него ввиду сложной картины геомагнитных возмущений, обусловленной влиянием авроральных электроджетов. Результаты расчёта МА для них нуждаются в независимой интерпретации. В данном исследовании рассматривались данные обсерваторий, расположенных между  $40$  и  $60^\circ$  северной геомагнитной широты. Расчет геомагнитных координат обсерваторий выполнен с помощью онлайн-сервиса *AACGM-v2 Coordinate Transformations*<sup>1</sup> [Shepherd, 2014] отдельно для 2015, 2016, 2017 и 2018 гг. Поскольку координаты изменяются незначительно, авторами использовались средние значения геомагнитных координат за указанные годы (см. табл. 2). Были проанализированы зависимости средних значений меры аномальности магнитного поля от геомагнитной широты для разных фаз бурь (рис. 5).

<sup>1</sup> [http://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm\\_calc.php](http://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm_calc.php)



**Рис. 5.** Зависимость средних значений МА (на вертикальных осях) от геомагнитной широты обсерваторий для начальных (левый столбец), главных (столбец по центру) и восстановительных (правый столбец) фаз пяти рассматриваемых бурь (см. табл. 1), расположенных по вертикали в хронологическом порядке. Над верхними горизонтальными осями – календарные даты, под нижними – магнитные обсерватории, упорядоченные по усредненной геомагнитной широте. Кружки – средние значения МА на геомагнитной широте обсерватории, серые линии – линейная регрессия, построенная методом наименьших квадратов, штриховые линии – границы доверительных интервалов

**Fig. 5.** Dependence of the AM average values (on the vertical axes) on the geomagnetic latitude of the observatories for the initial (left column), main (center column), and recovery (right column) phases of the five considered storms (see Table 1) located vertically in chronological order. Over the upper horizontal axis are calendar dates, under the bottom – magnetic observatories, ordered by the averaged geomagnetic latitude. Circles – AM average values on the geomagnetic latitude of the observatory, gray lines – linear regression constructed by the least-squares method, dashed lines – boundaries of confidence intervals

Для оценки тренда на тех графиках, где разброс значений МА не превышал выбранного авторами порогового значения 0.2, методом наименьших квадратов была построена линейная регрессия (серая линия) и рассчитаны доверительные интервалы (штриховые линии).

### Обсуждение результатов

По результатам анализа поведения МА на разных фазах магнитных бурь были отмечены общие для всех исследованных бурь закономерности.

Средние значения МА на начальной фазе уменьшаются с увеличением геомагнитной широты за исключением двух случаев, когда не удалось выявить каких-либо закономерностей в трендах (бури 06–08.03.2016 г. и 25–28.08.2018 г., см. рис. 5). Это обусловлено ослаблением влияния экваториальной токовой системы  $D_{st}$ , которая во многом определяет динамику магнитного поля на низкоширотных обсерваториях. С повышением геомагнитной широты её эффект ослабляется. На главной фазе средние значения МА в трех из пяти случаев возрастают с увеличением широты. Возрастающий тренд выражен сравнительно слабо и в некоторых случаях может отсутствовать, как, например, для магнитных бурь 06–08.03.2016 г. и 12–14.10.2016 г. В этих двух случаях за пределы доверительного интервала выходят только значения, полученные на обсерватории “Аркти”. Для фазы восстановления характерны возрастания значений МА по мере увеличения широты, что объясняется ростом влияния ионосферных токов, возникающих на заключительной стадии бури, при приближении к авроральной зоне. У всех рассмотренных бурь возрастающий тренд средних значений МА на фазе восстановления в целом одинаков.

В общем случае, чем сложнее картина условий формирования бури, тем менее отчетливый тренд наблюдается для меры аномальности на начальной фазе. Это касается, в том числе, и выбранных для изучения бурь с классической морфологией. Так, для бурь 06–08.03.2016 г. и 12–13.09.2017 г., относящейся к целой последовательности событий космической погоды и солнечной активности сентября 2017 г., затруднительно было отследить начало главной фазы.

Авторами были проанализированы другие индикаторы, входящие в комплекс МАГНУС [Gvishiani et al., 2016a; Гвишиани и др., 2018]. Например, в результате исследования скорости изменения магнитного поля по индикатору  $dB/dt$  не обнаружено каких-либо выраженных закономерностей для начальной фазы. Некоторые закономерности выявляются из анализа максимальных значений  $dB/dt$ . Так, почти для всех рассматриваемых бурь (кроме бури 12–13.09.2017 г.) наблюдался рост максимальных значений  $dB/dt$  на высоких геомагнитных широтах для главной и восстановительной фаз. Это напрямую связано с ростом потоков электронов, высыпающихся в ионосферу в течение указанных фаз.

Для рассматриваемых бурь были также проанализированы часовой индикатор амплитуды геомагнитных возмущений ( $Amp$ ) и трехчасовой оперативный  $K$ -индекс. Для индикатора  $Amp$  в целом характерен рост значений с увеличением геомагнитной широты для каждой из фаз, что соответствует влиянию различных токовых систем в зависимости от широты. Кроме того, индикатор  $Amp$  показал хорошее совпадение облака точек с линейной регрессионной моделью на фазе восстановления практически для всех бурь. Как и в случае оперативного  $K$ -индекса, для данных самой низкоширотной из отобранных обсерваторий (КНВ) во всех бурях значения  $Amp$  на фазе восстановления практически неизменны. Для оперативного  $K$ -индекса закономерности широтного распределения на протяжении начальной фазы магнитной бури аналогичны МА, но выражены более слабо. В период главной и восстановительной фаз отмечается возрастание значений

оперативного  $K$ -индекса с широтой. При этом соотношение и порядок средних значений между разными обсерваториями на восстановительной фазе сохраняются почти одними и теми же для всех бурь. Проведенные наблюдения подтверждают устойчивую работу МА при оценке геомагнитной активности, которая выражается в учете регионального характера изменчивости магнитного поля и отсутствии необходимости нормировки в зависимости от широты используемых данных. Подтверждением тому служат схожие значения МА на разных широтах в течение главной фазы той или иной бури. Ожидаемая незначительная широтная изменчивость на протяжении начальной и восстановительной фаз обусловлена доминированием кольцевого тока на низких широтах (на начальной фазе) и ионосферного электроджета на высоких широтах (на восстановительной фазе), которые оказывают локальный эффект на анализируемые данные.

### Заключение

Мера аномальности может применяться в решении задач, связанных с определением периодов как повышенной, так и пониженной геомагнитной активности. При выборе магнитно-спокойных временных интервалов МА имеет преимущества по сравнению с традиционной техникой на основе  $K_p$ -индекса и может быть использована для исследования устойчивых токовых систем низкоширотной ионосферы, таких как  $Sq$ .

Изучение повышенной магнитной активности с помощью меры аномальности показало, что применение МА позволяет успешно распознавать на магнитограммах сигнал внезапного начала бури, являющийся ценным предвестником магнитных бурь.

Проанализировав повышенную геомагнитную активность с помощью меры аномальности, установлено, что данный подход хорошо согласуется с классическими методами – путём обширного статистического анализа обсерваторских данных выявлено, что изменчивость значений МА близка к  $K$ -индексу независимо от геомагнитной широты и сезона. В отличие от  $K$ -индекса, МА обладает более высоким временным разрешением, соответствующим разрешению исходных геомагнитных данных, и может применяться к данным в автоматизированном режиме. Важно отметить, что конструкция меры аномальности не требует дополнительной нормировки, необходимой при расчете  $K$ -индекса для учета широтной специфики магнитных вариаций и носящей субъективный характер [Петров, 2018].

Средние значения МА на начальной фазе бури в целом уменьшаются с увеличением геомагнитной широты за счет ослабления влияния кольцевого тока. Благодаря своей нормировке мера аномальности учитывает специфику магнитных вариаций в регионе, и в большинстве случаев её значения в период главной фазы магнитной бури не зависят от широты. На восстановительной фазе при увеличении геомагнитной широты для всех рассмотренных бурь наблюдается слабое возрастание средних значений МА из-за большего вклада токов полярной ионосферы.

Использование меры аномальности для изучения повышенной геомагнитной активности дает возможности для исследования эволюции магнитной бури как глобального явления по совокупности обсерваторий в единой шкале. Разработанный на основе меры аномальности метод изучения пониженной геомагнитной активности и обнаружения магнитно-спокойных дней имеет потенциальные приложения в задачах моделирования как главного магнитного поля, так и геомагнитных вариаций, а также для поддержки технологического процесса наклонно-направленного бурения.

Метод оценки геомагнитной активности, предложенный в данной статье, требует дополнительных исследований с целью дальнейшей верификации. Авторы планируют провести анализ, основу которого будут составлять данные, полученные вдоль единого

геомагнитного меридиана или в разумно узкой долготной полосе, что позволит получить более представительные результаты. Также необходимо повысить статистическую значимость результатов посредством существенного расширения базы исходных данных. Увеличение выборки по обсерваториям и бурям также позволит лучше продемонстрировать устойчивость алгоритма МА в условиях региональной изменчивости режима вариаций.

### Благодарности

Представленные в статье результаты получены на основе данных, зарегистрированных на магнитных обсерваториях. Мы благодарим национальные институты, обеспечивающие их работоспособность, и INTERMAGNET за продвижение высоких стандартов в области геомагнитных наблюдений, а также Межрегиональный центр геомагнитных данных ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru>). Также мы признательны рецензентам за ценные замечания и предложения по статье.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра Российской академии наук, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. В работе использовались данные и сервисы Аналитического центра геомагнитных данных Геофизического центра Российской академии наук (<http://ckp.gcras.ru/>).

### Литература

- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // Докл. Академии наук. 2008. Т. 421, № 1. С.101–105.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008. Т. 44, № 3. С.3–18.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно-направленных скважин в Арктическом регионе // Горный журнал. 2015. № 10. С.94–99. doi: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.17>
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Физика Земли. 2018. № 4. С.19–30. DOI: 10.1134/S0002333718040051
- Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Сидоров Р.В., Краснопёров Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Карпетян Д.К., Симонян А.О. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН. 2018. № 10. NZ4001. doi: 10.2205/2018NZ000357
- Петров В.Г. Индексы геомагнитной активности и их роль в исследовании солнечно-земных связей // Астрономия-2018. 2018. С.186–189. doi: 10.31361/eas.2018-2.047
- Соловьёв А.А., Смирнов А.Г. Оценка точности современных моделей главного магнитного поля Земли с использованием ДМА-методов распознавания пониженной геомагнитной активности по данным геомагнитных обсерваторий // Физика Земли. 2018. № 6. С.72–86. doi: 10.1134/S0002333718060108
- Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., Sidorov R. The study of time series using the DMA methods and geophysical applications // Data Science Journal. 2016. V. 15. P.1–21. doi: <http://dx.doi.org/10.5334/dsj-2016-016>
- Anad F., Amory-Mazaudier C., Hamoudi M., Bourouis S., Abtout A., Yizengaw E. Sq solar variation at Medea Observatory (Algeria), from 2008 to 2011 // Adv. Space Res. 2016. V. 58, N 9. P.1682–1695. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.06.029>

- Bartels J., Heck N.H., Johnson H.F.* The three-hour-range index measuring geomagnetic activity // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1939. V. 44, N. 4. P.411–454.
- Bello O.R., Rabiou A.B., Yumoto K., Yizengaw E.* Mean solar quiet daily variations in the earth's magnetic field along East African longitudes // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54, N 3. P.283–289. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.058>, ISSN 0273-1177.
- Chambodut A., Marchaudon A., Lathuillère C., Menvielle M., Foucault E.* New hemispheric geomagnetic indices with 15 min time resolution // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120, N 11. P.9943–9958. doi: 10.1002/2015JA021479.
- Della-Rose D.J., Sojka J.J., Zhu L.* Resolving geomagnetic disturbances using “K-like” geomagnetic indices with variable time intervals // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1999. V. 61, N 15. P.1179–1194.
- Elemo E., Rabiou A.* Magnetospheric and ionospheric sources of geomagnetic field variations // *Open Access Library Journal*. 2014. V. 1, N 9. P.1–8. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101035>
- Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository // Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. doi: 10.2205/kli2011
- Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository // Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. doi: 10.2205/SPG2012
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V. M.* What is a Geomagnetic Storm? // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1994. V. 99, N A4. P.5771–5792.
- Gvishiani A.D., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A.* Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them // *Surveys in Geophysics*. 2014. V. 35, N 5. P.1123–1154. doi: 10.1007/s10712-014-9297-8
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.* Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment // *Data Sci. J.* 2016a. V. 15. 18 p. <https://doi.org/10.5334/dsj>
- Gvishiani A., Sidorov R., Lukianova R., Soloviev A.* Geomagnetic activity during St. Patrick's Day storm inferred from global and local indicators // *Russ. J. Earth Sci.* 2016b. V. 16, N 6. 8 p. ES6007. <https://doi.org/10.2205/2016ES000593>
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M.* Mid-latitude geomagnetic indices “ASY” and “SYM” for 1999 (provisional) // WDC for Geomagnetism, Kyoto, Japan. 2000. 10 p.
- Lincoln J.V.* Geomagnetic indices // *Physics of Geomagnetic Phenomena*. 1967. V. 1. P.67–100.
- Loewe C.A., Prölss G.W.* Classification and mean behavior of magnetic storms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1997. V. 102, N A7. P.14209–14213. doi: 10.1029/96JA04020
- Love J.J., Chulliat A.* An international network of magnetic observatories // *Eos. Transactions AGU*. 2013. V. 94, N 42. P.373–384. doi: 10.1002/2013EO420001
- Mandrikova O.V., Solovyev I.S., Geppener V.V., Klionskiy D.M., Al-Kasasbeh R.T.* Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach // *Digital Signal Processing*. 2013. V. 23, N 1. P.329–339. doi: 10.1016/j.dsp.2012.08.007
- Mandrikova O.V., Solovev I.S., Zalyaev T.L.* Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // *Earth, Planets and Space*. 2014. V. 66, N 1. 148 p. doi: 10.1186/s40623-014-0148-0
- Mayaud P.N.* Derivation, meaning and use of geomagnetic indices // *Geophysical Monograph Series*. 1980. V. 22. 154 p.
- Menvielle M.* About the derivation of geomagnetic indices from digital data // *fmi*. 1990. P.117–126.
- Menvielle M., Berthelier A.* The K-derived planetary indices: description and availability // *Reviews of Geophysics*. 1991. V. 29, N 3. P.415–432.
- Owolabi T.P., Rabiou A.B., Olayanju G.M., Bolaji O.S.* Seasonal variation of worldwide solar quiet of the horizontal magnetic field intensity // *Applied Physics Research*. 2014. V. 6, N 2. P.82–94. <https://doi.org/10.5539/apr.v6n2p82>
- Rangarajan G.K.* Indices of geomagnetic activity // *Geomagnetism*. 1989. V. 3. P.323–384.

- Shepherd S.G.* Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2014. V. 119, N 9. P.7501–7521. doi: 10.1002/2014JA020264
- Siebert M., Meyer J.* Geomagnetic Activity Indices // *The Upper Atmosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. P.887–911.
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov Sh.* Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // *Annals of Geophysics*. 2016. V. 59, N 6. G0653. doi: 10.4401/ag-7116
- Soloviev A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Kulchinskiy R., Zlotnicki J.* Mathematical Tools for Geomagnetic Data Monitoring and the INTERMAGNET Russian Segment // *Data Science Journal*. 2013. V. 12. P.WDS114–WDS119. doi: 10.2481/dsj.WDS-019
- Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R.* Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI) // *ESDB repository*. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. doi: 10.2205/kli2011min
- Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R.* Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG) // *ESDB repository*. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016a. doi: 10.2205/SPG2012min
- Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R.* 2015 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field // *ESDB repository*. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016b. <http://doi.org/10.2205/SPG2015min-def>
- Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R.* 2016 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field // *ESDB repository*. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. <https://doi.org/10.2205/SPG2016min-def>
- Soloviev A., Smirnov A., Gvishiani A., Karapetyan J., Simonyan A.* Quantification of Sq parameters in 2008 based on geomagnetic observatory data // *Advances in Space Research*. 2019. V. 64, Is. 11. P.2305–2320. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.038>
- Stankov S., Stegen K., Warnant R.* K-type geomagnetic index nowcast with data quality control // *Annals of Geophysics*. 2011. V. 54, N 3. P.285–295. DOI: 10.4401/ag-4655
- Takeda M.* Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2013. V. 118, N 7. P.4516–4522. <https://doi.org/10.1002/jgra.50386>
- Vichare G., Bhaskar A., Ramesh D.S.* Are the equatorial electrojet and the Sq coupled systems? Transfer entropy approach // *Advances in Space Research*. 2016. V. 57, N 9. P.1859–1870. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.020>

#### *Сведения об авторах*

**ОЩЕНКО Алексей Анатольевич** – инженер, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(977) 719-01-53. E-mail: a.oshchenko@gcras.ru

**СИДОРОВ Роман Викторович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(916) 044-67-59. E-mail: r.sidorov@gcras.ru

**СОЛОВЬЕВ Анатолий Александрович** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор, заведующий лабораторией, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3; ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 930-05-46. E-mail: a.soloviev@gcras.ru

**СОЛОВЬЕВА Екатерина Николаевна** – и. о. младшего научного сотрудника, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3; ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: e.solovieva@gcras.ru

## OVERVIEW OF ANOMALY MEASURE APPLICATION FOR ESTIMATING GEOMAGNETIC ACTIVITY

A.A. Oshchenko<sup>1</sup>, R.V. Sidorov<sup>1</sup>, A.A. Soloviev<sup>1,2</sup>, E.N. Solovieva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *The Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The possibilities of using the anomaly measures (AM) in the problems of determining periods of increased and decreased geomagnetic activity, as well as the dependences of the AM average values on geomagnetic latitude in different phases of geomagnetic storms was investigated. The analysis was performed on five storms related to the final stage of the 24th solar cycle in the period of 2015–2018 and was based on the data from eight magnetic observatories located between 40° N and 60°N and 29° E and 158° E. In general, the AM average values are latitude-independent for every storm, as the algorithm takes into account the regional regime of magnetic variations and provides a normalized estimation. At the initial phase, there is a slight decrease in the AM average values with the increasing geomagnetic latitude due to the weakening of the equatorial ring current contribution. In the recovery phase, the AM average value, on the contrary, slightly increase with latitude due to the greater contribution of the polar ionosphere electrojets which occur at the final stage of the storm when approaching the auroral zone. The AM also enables recognition of the storm sudden commencement signal. In determination of magnetically quiet time intervals, AM has advantages over the traditional technique based on the planetary  $K_p$ -index. This makes it possible to use AM to study the  $Sq$  current system of the low-latitude ionosphere, as well as to select the initial data for constructing models of the main magnetic field.

**Keywords:** Earth magnetism, magnetic activity, indices of magnetic activity.

### References

- Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., Sidorov R., The study of time series using the DMA methods and geophysical applications, *Data Science Journal*, 2016, vol. 15, pp. 1-21, doi: <http://dx.doi.org/10.5334/dsj-2016-016>
- Anad F., Amory-Mazaudier C., Hamoudi M., Bourouis S., Abtout A., Yizengaw E., Sq solar variation at Medea Observatory (Algeria), from 2008 to 2011, *Adv. Space Res.*, 2016, vol. 58, no. 9, pp. 1682-1695. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.06.029>
- Bartels J., Heck N.H., Johnson H.F., The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1939, vol. 44, no. 4, pp. 411-454
- Bello O.R., Rabiou A.B., Yumoto K., Yizengaw E., Mean solar quiet daily variations in the earth's magnetic field along East African longitudes, *Adv. Space Res.*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.058>, ISSN 0273-1177
- Chambodut A., Marchaudon A., Lathuillère C., Menvielle M., Foucault E., New hemispheric geomagnetic indices with 15 min time resolution, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, vol. 120, no. 11, pp. 9943-9958, doi: 10.1002/2015JA021479
- Della-Rose D.J., Sojka J.J., Zhu L., Resolving geomagnetic disturbances using “K-like” geomagnetic indices with variable time intervals, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1999, vol. 61, no. 15, pp. 1179-1194.
- Elemo E., Rabiou A., Magnetospheric and ionospheric sources of geomagnetic field variations, *Open Access Library Journal*, 2014, vol. 1, no. 9, pp. 1-8, <https://doi.org/10.4236/oalib.1101035>
- Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI), ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, doi: 10.2205/kli2011
- Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG), ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, doi: 10.2205/SPG2012

- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M., What is a Geomagnetic Storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, vol. 99, no. A4, pp. 5771-5792.
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R., Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment, *Data Sci. J.*, 2016a, vol. 15, 18 p, <https://doi.org/10.5334/dsj>
- Gvishiani A., Sidorov R., Lukianova R., Soloviev A., Geomagnetic activity during St. Patrick's Day storm inferred from global and local indicators, *Russ. J. Earth Sci.*, 2016b, vol. 16, no. 6, 8 p. ES6007, <https://doi.org/10.2205/2016ES000593>
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Fuzzy recognition of anomalies in time series, *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 421, no. 1, pp. 838-842.
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Zlotniki J., Bonnin J., Mathematical methods of geoinformatics. III. Fuzzy comparisons and recognition of anomalies in time series, *Cybernetics and system analysis*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 309-323.
- Gvishiani A.D., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A., Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them, *Surveys in Geophysics*, 2014, vol. 35, no. 5, pp. 1123-1154, doi: 10.1007/s10712-014-9297-8
- Gvishiani A.D., Lukyanova R.Yu., The study of the geomagnetic field and the problem of accuracy of drilling directional wells in the Arctic region, *Gornyi Zhurnal*, 2015, no. 10, pp. 94-99, doi: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.17>
- Gvishiani A.D., Lukyanova R.Yu., Evaluation of the influence of geomagnetic disturbances on the trajectory of directional drilling of deep wells in the Arctic region, *Physics of the Earth*, 2018, no. 4, pp. 19-30, DOI: 10.1134/S0002333718040051
- Gvishiani A.D., Soloviev A.A., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I., Grudnev A.A., Kudin D.V., Karapetyan D.K., Simonyan A.O., Successes in the organization of geomagnetic monitoring in Russia and neighboring countries. *Vestnik ONZ RAN*, 2018, no. 10, NZ4001, doi: 10.2205/2018NZ000357
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M., Mid-latitude geomagnetic indices "ASY" and "SYM" for 1999 (provisional), WDC for Geomagnetism, Kyoto, Japan, 2000, 10 p.
- Lincoln J.V., Geomagnetic indices, *Physics of Geomagnetic Phenomena*, 1967, vol. 1, pp. 67-100.
- Loewe C.A., Prölss G.W., Classification and mean behavior of magnetic storms, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, vol. 102, no. A7, pp. 14209-14213, doi: 10.1029/96JA04020
- Love J.J., Chulliat A., An international network of magnetic observatories, *Eos. Transactions AGU*, 2013, vol. 94, no. 42, pp. 373-384, doi: 10.1002/2013EO420001
- Mandrikova O.V., Solovev I.S., Zalyaev T.L., Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data, *Earth, Planets and Space*, 2014, vol. 66, no. 1, 148 p, doi: 10.1186/s40623-014-0148-0
- Mandrikova O.V., Solovyev I.S., Geppener V.V., Klionskiy D.M., Al-Kasasbeh R.T., Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach, *Digital Signal Processing*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 329-339, doi: 10.1016/j.dsp.2012.08.007
- Mayaud P.N., Derivation, meaning and use of geomagnetic indices, *Geophysical Monograph Series*, 1980, vol. 22, 154 p.
- Menvielle M., Berthelier A., The K-derived planetary indices: description and availability, *Reviews of Geophysics*, 1991, vol. 29, no. 3, pp. 415-432.
- Menvielle M., About the derivation of geomagnetic indices from digital data, *fmi*, 1990, pp. 117-126.
- Owolabi T.P., Rabiou A.B., Olayanju G.M., Bolaji O.S., Seasonal variation of worldwide solar quiet of the horizontal magnetic field intensity, *Applied Physics Research*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 82-94, <https://doi.org/10.5539/apr.v6n2p82>
- Petrov V.G., Indices of geomagnetic activity and their role in the study of solar-terrestrial relations, *Astronomy-2018*, 2018, pp. 186-189, doi: 10.31361/eaas.2018-2.047
- Rangarajan G.K., Indices of geomagnetic activity, *Geomagnetism*, 1989, vol. 3, pp. 323-384.
- Shepherd S.G., Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, vol. 119, no. 9, pp. 7501-7521, doi: 10.1002/2014JA020264
- Siebert M., Meyer J., Geomagnetic Activity Indices. In: Dieminger W. et al. (eds.) *The Upper Atmosphere*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, pp. 887-911.
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov Sh., Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness, *Annals of Geophysics*, 2016, vol. 59, no. 6, G0653, doi: 10.4401/ag-7116
- Soloviev A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Kulchinskiy R., Zlotnicki J., Mathematical Tools for Geomagnetic Data Monitoring and the INTERMAGNET Russian Segment, *Data Science Journal*, 2013, vol. 12, pp. WDS114-WDS119, doi: 10.2481/dsj.WDS-019

- Soloviev A., Smirnov A., Gvishiani A., Karapetyan J., Simonyan A., Quantification of Sq parameters in 2008 based on geomagnetic observatory data, *Advances in Space Research*, 2019, vol. 64, is. 11, pp. 2305-2320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.038>
- Soloviev A.A., Smirnov A.G., Evaluation of the accuracy of modern models of the Earth's main magnetic field using DMA methods for recognizing reduced geomagnetic activity according to geomagnetic observatories, *Physics of the Earth*, 2018, no. 6, pp. 72-86, doi: 10.1134/S0002333718060108
- Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R., Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG), *ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016a, doi: 10.2205/SPG2012min
- Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R., Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI), *ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, doi: 10.2205/kli2011min
- Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R., 2015 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field, *ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016b, <http://doi.org/10.2205/SPG2015min-def>
- Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R., 2016 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field, *ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, <https://doi.org/10.2205/SPG2016min-def>
- Stankov S., Stegen K., Warnant R., K-type geomagnetic index nowcast with data quality control, *Annals of Geophysics*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 285-295, DOI: 10.4401/ag-4655
- Takeda M., Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, vol. 118, no. 7, pp. 4516-4522, <https://doi.org/10.1002/jgra.50386>
- Vichare G., Bhaskar A., Ramesh D.S., Are the equatorial electrojet and the Sq coupled systems? Transfer entropy approach, *Advances in Space Research*, 2016, vol. 57, no. 9, pp. 1859-1870, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.020>