

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, АВРОРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДЖЕТА И ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ

STATISTICAL RELATIONSHIPS BETWEEN VARIATIONS OF THE GEOMAGNETIC FIELD, AURORAL ELECTROJET, AND GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS

А.В. Воробьев

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия, geomagnet@list.ru

В.А. Пилипенко

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

Я.А. Сахаров

Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, sakharov@pgia.ru

В.Н. Селиванов

Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, selivanov@ien.kolasc.net.ru

A.V. Vorobev

Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia, geomagnet@list.ru

V.A. Pilipenko

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

Ya.A. Sakharov

Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, sakharov@pgia.ru

V.N. Selivanov

Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia, selivanov@ien.kolasc.net.ru

Аннотация. На основе данных за 2015 г. магнитных обсерваторий сети IMAGE и станции по регистрации геоиндуцированных токов (ГИТ) в линии электропередачи исследуются корреляционные взаимосвязи между вариациями геомагнитного поля и ГИТ. Наибольшую корреляцию интенсивность ГИТ имеет с вариабельностью поля $|d\mathbf{B}/dt|$ ($R > 0.7$), при этом коэффициенты корреляции ГИТ с вариациями производных X - и Y -компонент близки. Суточный ход как среднего значения вариабельности поля $|d\mathbf{B}/dt|$, так и интенсивности ГИТ имеет широкий ночной максимум, связанный с электроджетом, и утренний максимум, предположительно обусловленный интенсивными геомагнитными пульсациями типа Pc5–Pi3. Построена регрессионная линейная модель для оценки величины ГИТ по производной по времени геомагнитного поля и AE -индексу. Статистические распределения плотности вероятности значений AE -индекса, производной геомагнитного поля и ГИТ соответствуют логарифмически нормальному закону. На основании построенных распределений оценены вероятности экстремальных значений изучаемых величин.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геомагнитные вариации, геоиндуцированные токи, авроральный электроджет.

Abstract. Using observations from the IMAGE magnetic observatories and the station for recording geomagnetically induced currents (GIC) in the electric transmission line in 2015, we examine relationships between geomagnetic field and GIC variations. The GIC intensity is highly correlated ($R > 0.7$) with the field variability $|d\mathbf{B}/dt|$ and closely correlated with variations in the time derivatives of X and Y components. Daily variations in the mean geomagnetic field variability $|d\mathbf{B}/dt|$ and GIC intensity have a wide night maximum, associated with the electrojet, and a wide morning maximum, presumably caused by intense Pc5–Pi3 geomagnetic pulsations. We have constructed a regression linear model to estimate GIC from the time derivative of the geomagnetic field and AE index. Statistical distributions of the probability density of the AE index, geomagnetic field derivative, and GIC correspond to the log-normal law. The constructed distributions are used to evaluate the probabilities of extreme values of GIC and $|d\mathbf{B}/dt|$.

Keywords: geomagnetic field, geomagnetic variations, geomagnetically induced currents, auroral electrojet.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по проблемам космической погоды стимулируются, с одной стороны, фундаментальным научным интересом к рассмотрению геофизических оболочек Земли как единой динамической системы, с другой — необходимостью обеспечения

устойчивой работы технологических систем. Одно из наиболее существенных проявлений космической погоды — возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в проводящих технологических конструкциях (энергетические системы, трубопроводы, кабельные сети) во время магнитных бурь и суббурь. По мере развития технологий энергетические системы (линии

электропередач — ЛЭП, релейные линии, трансформаторные подстанции) становятся все более подверженными возмущениям космической погоды [Сушко, Косых, 2013]. Современные энергетические сети с крайне сложной геометрией оказываются, по существу, гигантской антенной, электромагнитно-сопряженной с токами ионосферы Земли. В наземных сетях во время магнитных бурь наблюдались ГИТ до 200–300 А [Pitjola et al., 2003], в то время как токов с интенсивностью всего несколько ампер достаточно, чтобы вывести некоторые типы трансформаторов из линейного режима [Вахнина, 2012]. Хотя наиболее мощные возмущения геомагнитного поля, приводящие к возбуждению интенсивных ГИТ в проводящих конструкциях, происходят в авроральных широтах, в последнее время обнаружено, что опасные величины ГИТ могут наблюдаться также на средних и низких широтах [Kelly et al., 2017].

Диагностика и прогнозирование уровней ГИТ при различных типах геомагнитных возмущений, которые могут быть использованы операторами сетей для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, являются исключительно актуальной задачей. При этом решение такой задачи не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики для расчета ГИТ в конкретных технологических системах, а требует выяснения физической природы некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Наибольшие возмущения магнитного поля на земной поверхности вызываются протяженным авроральным электроджетом, создающим магнитные возмущения, ориентированные в долготном (С-Ю) направлении и представляющие опасность преимущественно для технологических систем, вытянутых в широтном (В-З) направлении [Boteler et al., 1998]. Однако в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, значимый вклад могут вносить мелкомасштабные ионосферные токовые структуры, создающие почти изотропные возмущения полей и токов [Viñjanen, 1997; Белаховский и др., 2018]. Природа таких структур и закономерности их появления пока не выяснены.

В геофизической литературе описано немало отдельных событий, в которых прослеживается связь между вариациями геомагнитного поля и ГИТ во время таких проявлений космической погоды, как межпланетные ударные волны [Fiori et al., 2014; Пилипенко и др., 2018], взрывные начала суббурь [Viñjanen et al., 2006] и магнитные бури [Карпенман, 2005]. В то же время статистические исследования связи вариаций геомагнитного поля и ГИТ крайне малочисленны [Viñjanen, Tanskanen, 2011]. Исследования эффектов воздействия космической погоды на технологические системы сдерживаются отсутствием баз данных о сбоях в функционировании технологических систем, доступных для научного анализа. Данная работа в значительной степени основана на данных единственной в России системы регистрации ГИТ в ЛЭП, развернутой на Кольском полуострове и в Карелии [Sakharov et al., 2007, 2009].

В работе приводятся статистические характеристики за 2015 г., описывающие связь между геомаг-

нитными возмущениями, вариабельностью геомагнитного поля, геомагнитными индексами (AE , PCN) и ГИТ. В случае замкнутого провода в вакууме величина ГИТ полностью определялась бы законом электромагнитной индукции, т. е. производной геомагнитного поля по времени $d\mathbf{B}/dt$. В реальности даже в простейшем случае ГИТ возникает в пространственно-распределенной системе, образованной ЛЭП, подстанциями с плохо известными характеристиками и подстилающей земной поверхностью с частотно-зависимыми анизотропными геоэлектрическими свойствами. Поэтому простая характеристика динамики геомагнитного поля, полностью определяющая величину ГИТ, вряд ли существует. Для практических же приложений важно оценить, какой величины ГИТ можно ожидать при различных геомагнитных возмущениях. Знание таких эмпирических связей необходимо для построения диагностических моделей величины ГИТ на основании общих параметров космической погоды, характеризующих состояние межпланетной среды и магнитосферы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

В системе регистрации воздействия магнитосферных возмущений на ЛЭП на Кольском полуострове и в Карелии измеряемым параметром (с разрешением по времени 1 мин) является протекающий в глухозаземленной нейтрали трансформатора квазипостоянный ток, который связан с ГИТ в ЛЭП. Подробное описание этой сети размещено на сайте [<http://eurisgic.org>], посвященном изучению воздействия геомагнитных возмущений на европейские энергетические системы. Для исследования выбран пункт «Выходной» (VKH) (географические координаты 68.83° N, 33.08° E), в котором ведется регистрация ГИТ на магистральной линии 330 кВ.

Поскольку в непосредственной близости от ЛЭП магнитометрические наблюдения невозможны, использованы данные магнитных станций сети IMAGE [www.geo.fmi.fi/image]. Использованы 10-секундные данные магнитных обсерваторий, ближайших к ГИТ-станции: IVA (географические координаты 68.56° N, 27.29° E, удаление 236 км), KEV (69.76° N, 27.01° E, удаление 260 км) и SOD (67.37° N, 26.63° E, удаление 313 км). Станция IVA находится на одной геомагнитной широте с VKH. Все использованные в работе временные ряды были децимированы к шагу дискретизации 1 мин. С целью исключения влияния высокочастотных составляющих при децимации был применен цифровой фильтр с окном с плоской вершиной [Дворкович, Дворкович, 2014].

В качестве глобальных характеристик космической погоды на авроральных и полярных широтах использованы 1-минутные индексы AE [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir>] и PCN [<http://www.geophys.aari.ru>]. AE -индекс характеризует общепланетарное возмущение геомагнитного поля на авроральных широтах, создаваемое авроральным электроджетом. PCN -индекс, рассчитываемый по данным магнитных наблюдений в северной полярной шапке, характеризует энергию, переносимую из солнечного ветра в магнитосферу [Stauning, 2018].

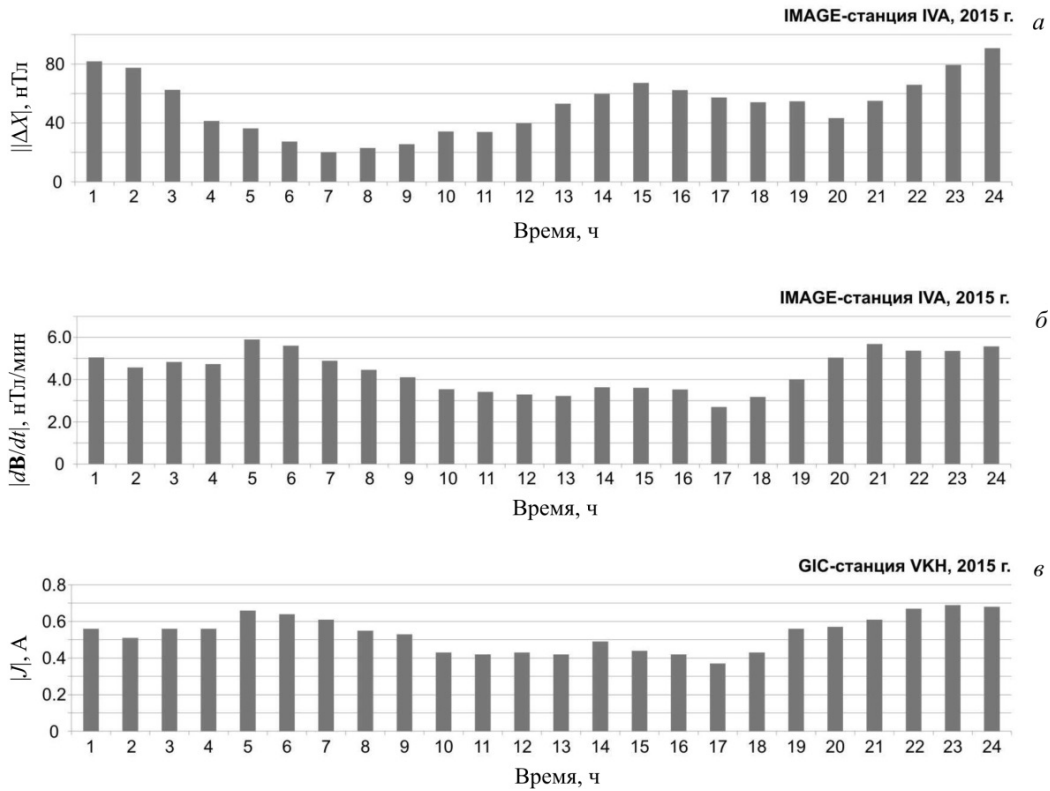


Рис. 1. Суточный ход средних величин: а — магнитного возмущения $|\Delta X|$; б — вариабельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$; в — интенсивности ГИТ $|J|$ (на станции IVA за 2015 г.)

На начальном этапе были проведены унификация и анализ полноты и взаимного соответствия временных рядов данных наблюдений магнитных и ГИТ-станций, а также *AE*- и *PCN*-индексов. Анализ полноты временных рядов показал, что за 2015 г. станцией VKH пропущено 1.625 % значений, IVA — 4.9 %; SOD — 0.13 %, KEV — 0.01 %, 8.5 % пропущенных значений имеется во временных рядах *AE*-индекса и 4.6 % — *PCN*-индекса. Для перекрестного анализа подходит ~93.3 % общего объема данных, что составляет 490 385 значений.

Для непрерывных участков данных рассчитаны возмущения горизонтальной компоненты геомагнитного поля $\Delta\mathbf{B} = \{\Delta X, \Delta Y\}$ (X — С-Ю- и Y — В-З-компоненты поля) и первых производных по времени $d\mathbf{B}/dt = \{dX/dt, dY/dt\}$, нТл/мин. При горизонтальной однородности геоэлектрических свойств подстилающей среды ориентация вектора $d\mathbf{B}/dt$ соответствует ориентации возбуждаемого теллурического поля \mathbf{E} . Значения $\Delta\mathbf{B}$ рассчитывались относительно уровня \mathbf{B}_0 , в качестве которого бралось среднее значение $\mathbf{B}(t)$ за сутки на данной магнитной станции. На авроральных широтах магнитное возмущение может создаваться как западным, так и восточным электроджетом, что проявляется в уменьшении или увеличении X -компоненты соответственно ($\Delta X < 0$ или $\Delta X > 0$). Чтобы избежать трудностей с изменением знака магнитного возмущения, в дальнейшем используются абсолютные значения компонент $|\Delta X|, |\Delta Y|$. В качестве единой характеристики вариабельности поля во времени используются абсолютные значения как производных гори-

зонтальных компонент $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$, так и полной производной $|d\mathbf{B}/dt| = \sqrt{(dX/dt)^2 + (dY/dt)^2}$.

СУТОЧНЫЙ ХОД ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ГИТ

Нами построены гистограммы средних значений за 2015 г. различных характеристик геомагнитной возмущенности и ГИТ для 1-часовых интервалов местного времени (LT). Суточный ход глобального индекса *AE* не имеет выраженных максимумов и минимумов (не показан). Расчет суточного хода магнитного возмущения $|\Delta X|$ на станции IVA (рис. 1, а) показал наличие полуночного (LT~24) и послеполуночного (LT~15) максимумов. Эти максимумы вызваны интенсификацией западного и восточного электроджетов над станцией во время суббуревых активизаций.

Суточный ход среднего значения вариабельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ на станции IVA (рис. 1, б) имеет несколько иной характер с широкими ночным (LT~21–01) и утренним (LT~5–6) максимумами. Ночной максимум, очевидно, связан с электроджетом. Повышенная вариабельность поля в утренние часы, предположительно, обусловлена интенсивными геомагнитными пульсациями диапазона Pc5–Pi3, которые наблюдаются наиболее часто именно в ранние утренние часы [Клейменова, Козырева, 2004; Rahud et al., 2009]. Появление больших значений производной по времени геомаг-

нитного поля при появлении P₃-пульсаций отмечалось Яговой и др. [2018]. Суточный ход средней интенсивности ГИТ на станции VKN повторяет ход вариабельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ (рис. 1, в).

Проведенный в [Vi]janen, Tanskanen, 2011] расчет суточного хода $d\mathbf{B}/dt$ за многолетний период на высокоширотных станциях сети IMAGE также показал наличие утреннего и полуденного максимумов, относительные величины которых варьировали в зависимости от сезона. Восстановление аврорального электроджета вдоль меридиана $\sim 22^\circ$ E по данным сети IMAGE дало следующие закономерности суточного хода: восточный электроджет преобладает в послеполуденные часы (13–21 MLT), в остальные часы преобладает западный электроджет с максимумом в $\sim 01:30$ MLT. Наши результаты подтверждают, что утренний максимум в суточном ходе $|d\mathbf{B}/dt|$ не имеет соответствия в распределении интенсивности геомагнитных возмущений $|\Delta X|$, создаваемых электроджетом, а в области максимального восточного электроджета не наблюдается увеличения уровня вариаций $|d\mathbf{B}/dt|$.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ГИТ, ВАРИАБЕЛЬНОСТЬЮ ПОЛЯ И ГЕОМАГНИТНЫМИ ИНДЕКСАМИ

Знание статистических связей необходимо в качестве первого шага для построения диагностических моделей величины ГИТ на основании общих характеристик космической погоды [Weigel et al., 2003]. Выясним, насколько геомагнитные индексы, характеризующие суббуревую активность (AE , PCN и др.), достаточны для предсказания величины ГИТ. Для этого проведен расчет корреляционных связей между абсолютной величиной ГИТ $|J|$, регистрируемого станцией VKN, и основными геомагнитными индексами за 2015 г. Кросскорреляционная функция $R(\tau)$ изучаемых временных рядов имеет максимальное значение при $\tau=0$. Следует иметь в виду, что значения коэффициентов корреляции за конкретный интервал времени могут отличаться от среднегодовых значений и варьировать в диапазоне 0.2–0.95.

Максимальная корреляция наблюдается между $|J|$ и глобальными индексами AE ($R=0.56$) и AL ($R=0.55$). Корреляция с индексом AU ниже: $R=0.44$. Таким образом, при моделировании и прогнозе вариаций ГИТ первостепенное внимание мы будем уделять поведению AE -индекса. Хотя считается, что PCN -индекс хорошо характеризует суббуревую активность, корреляция ГИТ с AE -индексом оказывается выше, чем с PCN -индексом ($R=0.44$).

Выясним, насколько величины локальной геомагнитной возмущенности и вариабельности поля достаточны для предсказания величины ГИТ. В табл. 1 представлен результат расчета коэффициента корреляции Пирсона R между абсолютной величиной ГИТ $|J|$, регистрируемого станцией VKN, возмущениями геомагнитного поля $|\Delta X|$, $|\Delta Y|$ и скоростью

изменения компонент поля $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ на станциях IVA, KEV и SOD за 2015 г.

Корреляция $|J|$ со скоростью изменения горизонтальных компонент магнитного поля $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$ оказывается выше, чем с амплитудой возмущения поля $|\Delta X|$, $|\Delta Y|$ в среднем на 31.5 %. Другими словами, корреляционная связь величины ГИТ с производной поля по времени более сильная, чем с возмущением поля.

Коэффициенты корреляции $|J|$ с вариациями производных X - и Y -компонент оказались близки. Этот результат подтверждает, что производная поля $d\mathbf{B}/dt$ флуктуирует не только по величине, но и по направлению, что может быть вызвано присутствием быстроменяющихся локальных вихревых структур, наложенных на магнитное поле аврорального электроджета [Vi]janen, 1997].

Вклад быстрых вариаций геомагнитного поля может быть различным для периодов магнитных бурь и небуревых интервалов. Для проверки этого предположения для магнитной бури 17–18 марта 2015 г. («буря Святого Патрика») с 06 UT 17.03.2015 по 06 UT 18.03.2015 рассчитаны коэффициенты корреляции между ГИТ и вариабельностью геомагнитного поля на разных магнитных станциях (табл. 1, нижняя строка). Во время бури корреляционные связи между ГИТ и вариабельностью геомагнитного поля оказались практически теми же, что и в среднем за год (табл. 1, верхняя строка). При этом корреляция $|J|$ с $|dY/dt|$ даже несколько выше, чем корреляция с $|dX/dt|$. Таким образом, вклад вариабельности Y -компоненты в интенсивность $|J|$ соизмерим с вкладом вариабельности X -компоненты как для периода магнитной бури, так и во время небуревых интервалов.

Возникает вопрос, насколько хорошо геомагнитные индексы AE , PCN , характеризующие суббуревую активность, характеризуют вариабельность геомагнитного поля, т. е. $d\mathbf{B}/dt$. Для ответа на него проведен расчет корреляционных связей между этими индексами и $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ по данным за 2015 г. (табл. 2, верхняя строка).

AE -индекс хорошо коррелирует с $|\Delta X|$, что естественно, поскольку этот индекс рассчитывается по данным о магнитных возмущениях на авроральных станциях. Вариабельность поля также зависит от суббуревой активности, характеризуемой AE -индексом. Однако коэффициенту корреляции между вариабельностью поля и AE -индексом $R \sim 0.6$ соответствует коэффициент детерминации $D = R^2 \sim 0.36$, т. е. вариабельность поля $|d\mathbf{B}/dt|$ только на ~ 40 % определяется интенсивностью электроджета (AE -индексом).

Чтобы проверить, насколько меняется связь между индексами AE и PCN и вариабельностью поля во время магнитных бурь, рассчитаны коэффициенты корреляции между ними для периода магнитной бури 17–18 марта 2015 г. (табл. 2, вторая и третья строки). Непосредственно для периода бури обнаруживается более высокая корреляция между AE -индексом и производной поля $|dX/dt|$: $R \sim 0.8$, чем в среднем за год: $R \sim 0.6$. Анализ корреляции между временными рядами PCN и $|dX/dt|$ показывает аналогичную картину (табл. 2, нижняя строка).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции R между $|J|$ и геомагнитными вариациями на ближайших к пункту VKN магнитных станциях

	IVA				SOD				KEV			
	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $
2015	0.493	0.696	0.442	0.672	0.488	0.679	0.430	0.627	0.478	0.679	0.427	0.677
Буря		0.623		0.713		0.617		0.699		0.547		0.644

Таблица 2

Коэффициенты корреляции R AE - и PCN -индексов с вариациями и вариабельностью X - и Y -компонент поля

	IVA				SOD				KEV			
	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $	$ \Delta X $	$ dX/dt $	$ \Delta Y $	$ dY/dt $
2015	0.643	0.585	0.504	0.582	0.643	0.614	0.493	0.576	0.631	0.549	0.513	0.572
AE -буря		0.846		0.585		0.768		0.751		0.803		0.264
PCN -буря		0.911		0.641		0.872		0.821		0.799		0.309

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИТ

Для прикладных оценок важно знать, какой величины ГИТ можно ожидать при текущем состоянии электроджета, характеризуемом AE -индексом, и уровне вариабельности геомагнитного поля. Для ответа на этот вопрос была синтезирована линейная регрессионная модель, которая в общем случае имеет вид

$$|J| = w_0 + \sum_{i=1}^N (w_i \cdot C_i) \pm \Delta, \quad (1)$$

где C_i — управляющие параметры ($i=1, N$); w — весовые коэффициенты модели; Δ — средняя ошибка моделирования. Модель вида (1) позволяет по значениям N управляющих параметров C_i оценить статистически величину ГИТ $|J|$. Если строить модель по всем зарегистрированным значениям, то она будет определяться малыми возмущениями ГИТ, которые не очень интересны. Поэтому для построения регрессионной модели стоит отбирать значения большие определенного порога, что приведет к росту коэффициентов w .

Линейные регрессионные модели были построены для AE -индекса и вариабельности магнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ на станции IVA за два месяца (с 1 марта по 30 апреля 2015 г.) — самый большой интервал, на котором отсутствуют пропуски по всем анализируемым параметрам.

$$|J| = w_0 + w_1 |d\mathbf{B} / dt| \pm \Delta_1; \quad (2)$$

$$|J| = w_0 + w_2 |AE| \pm \Delta_2.$$

Весовые коэффициенты w_1, w_2 в выражениях (2) рассчитывались методом градиентного спуска.

Расчет за 2015 г. по редуцированной модели (с исключением из выборки $|d\mathbf{B}/dt| < 1$ нТл/мин) для станции IVA дает следующие значения коэффициентов: $w_0=0, w_1=0.074$ А·мин/нТл и $w_2=0.0022$ А/нТл. На рис. 2 приведено сопоставление моделированных значений ГИТ с фактически наблюдаемыми для периода сложной магнитной бури 17 марта 2015 г. с серией суббуревых активизаций. Сопоставление

предсказаний моделей (2) с измеренными значениями показывает, что модель на основе AE -индекса хорошо предсказывает моменты появления ГИТ, но не их величину. Модель на основе $|d\mathbf{B}/dt|$ хорошо предсказывает моменты усиления ГИТ и их величину, но недооценивает экстремальные значения. В рассматриваемом временном интервале модели (2) дают средние ошибки $\Delta_1 = \pm 0.91$ А и $\Delta_2 = \pm 1.78$ А. Таким образом, для оценки вариаций ГИТ наиболее предпочтительна регрессионная модель с использованием параметра $|d\mathbf{B}/dt|$. В принципе, оценивать возможный уровень вариаций ГИТ в ЛЭП можно и по текущим значениям AE -индекса, однако это целесообразно для более узкого диапазона значений, при этом среднеквадратическая ошибка увеличится на ~50 %.

В целом статистическая модель хорошо работает (малые Δ_1) для промежуточных значений $|d\mathbf{B}/dt|$, вероятность появления которых составляет не менее ~1 % (что статистически соответствует $|d\mathbf{B}/dt| < 40$ нТл/мин и $|J| < 3$ А) и для промежуточных значений AE -индекса, вероятность появления которых составляет не менее ~24 % (что статистически соответствует $AE < 300$ нТл и уровню $|J| < 0.7$ А). Для больших значений ГИТ ($|J| > 20$ А) регрессионная модель на основе данных о вариабельности поля имеет вид (2) при $\Delta_1 = \pm 2.3$ А, $w_0 = 11.677$ А, $w_1 = 0.11$ А·мин/нТл.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ГИТ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вид функции вероятности $F(x)$ амплитуды возмущения x определяется физическими механизмами изучаемого процесса. Так, при случайных независимых воздействиях формируется нормальное (гаусово) распределение; в замкнутой системе энергия ее компонент распределяется по экспоненциальному закону Больцмана—Лапласа; самоподобное распределение (типа Парето) по степенному закону часто приписывается самоорганизованной критичности; случайный мультипликативный выбор из нескольких параметров приводит к логнормальному распреде-

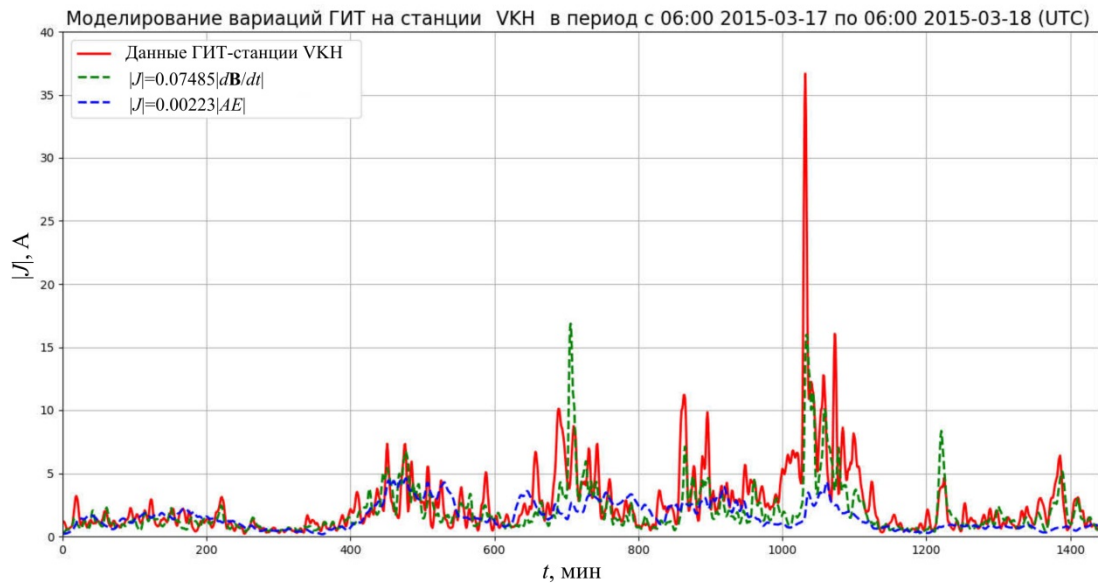


Рис. 2. Результат моделирования ГИТ для периода бури с 00:00 по 24:00 УТ 17 марта 2015 г.

нию и т. п. Важное значение имеет наличие тяжелых хвостов распределения [Писаренко, Родкин, 2007]. При таких степенных распределениях дисперсия изучаемой величины определяется преимущественно редкими интенсивными отклонениями, а не частыми небольшими отклонениями. Не зная в полной мере характер распределения, а опираясь только на средние значения, можно прийти к ложным заключениям о свойствах системы.

Из обычно встречающихся в геофизических исследованиях распределений [Chisham, Freeman, 2010] для рассматриваемых величин наиболее близкими оказались логнормальное распределение (σ — параметр формы)

$$F(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x)}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

и обобщенное степенное распределение Парето (параметр формы $c > 0$)

$$F(x) = (1 + cx)^{-1/c}. \quad (4)$$

Нормированная гистограмма $F(x)$ дает распределение плотности вероятности, т. е. каждое значение — это вероятность наблюдения данного x на заданном интервале Δx в течение анализируемого периода. На рис. 3 представлены нормированные гистограммы распределения плотности вероятности значений AE -индекса за 2015 г. Анализ нормированных гистограмм выявил, что распределение плотности вероятности значений AE -индекса наилучшим образом соответствует логнормальному распределению (см. рис. 3, табл. 3).

На рис. 4 представлены нормированные гистограммы возмущения X -компоненты на станции SOD за 2015 г. Согласно табл. 3, распределение плотности вероятности значений $|\Delta X|$ наиболее соответствует обобщенному распределению Парето (3).

Гистограммы распределения значений $|dB/dt|$ даны на рис. 5, а значений $|J|$ — на рис. 6. Распреде-

ние плотности вероятности значений временных рядов $|dB/dt|$ и $|J|$ наилучшим образом аппроксимируется логнормальным распределением.

Результаты, приведенные на рис. 4, 5 для станции SOD, для станций IVA и KEV имеют аналогичный характер и здесь не приводятся.

Полученные негауссовы распределения позволяют корректно определить медиану, математическое ожидание и вероятность наблюдения анализируемых параметров в заданном диапазоне, оценить принадлежность зарегистрированных значений к аномальным. Знание статистического распределения вероятности флуктуаций позволяет оценить вероятность экстремального события, которое в период наблюдения может даже не наблюдаться (предполагая, что оно подчиняется тем же закономерностям) [Pulkkinen et al., 2012]. По кривой вероятности (рис. 3–6) можно оценить статистически, какое максимальное возмущение AE , dB/dt и J возможно за заданный период наблюдения. Статистика показывает, что в 2015 г. значения $|AE| > 1000$ нТл наблюдались ~ 1 % времени, $|J| > 10$ А ~ 0.03 % времени и $|dB/dt| > 60$ нТл/мин ~ 0.2 % времени.

С вероятностью ~ 0.01 % (примерно 50 раз в год) возможны возмущения с $|AE| > 2000$ нТл, региональные возмущения ГИТ и магнитного поля с $|J| > 13$ А, $|dB/dt| > 113$ нТл/мин и $|\Delta X| > 880$ нТл. Значимые вариации ГИТ ($|J| > 1$ А) наблюдаются с вероятностью ~ 9.7 %.

Оценив и проанализировав статистические характеристики исследуемых временных рядов, можно говорить о схожести их статистик, а следовательно, и о подобии их физических механизмов. Для проверки гипотезы о принадлежности анализируемой выборки некоторому известному закону распределения использован критерий Колмогорова, характеризующий абсолютное максимальное расхождение экспериментальных кривых и предполагаемого известного распределения: распределение с минимальным значением этого критерия наилучшим образом

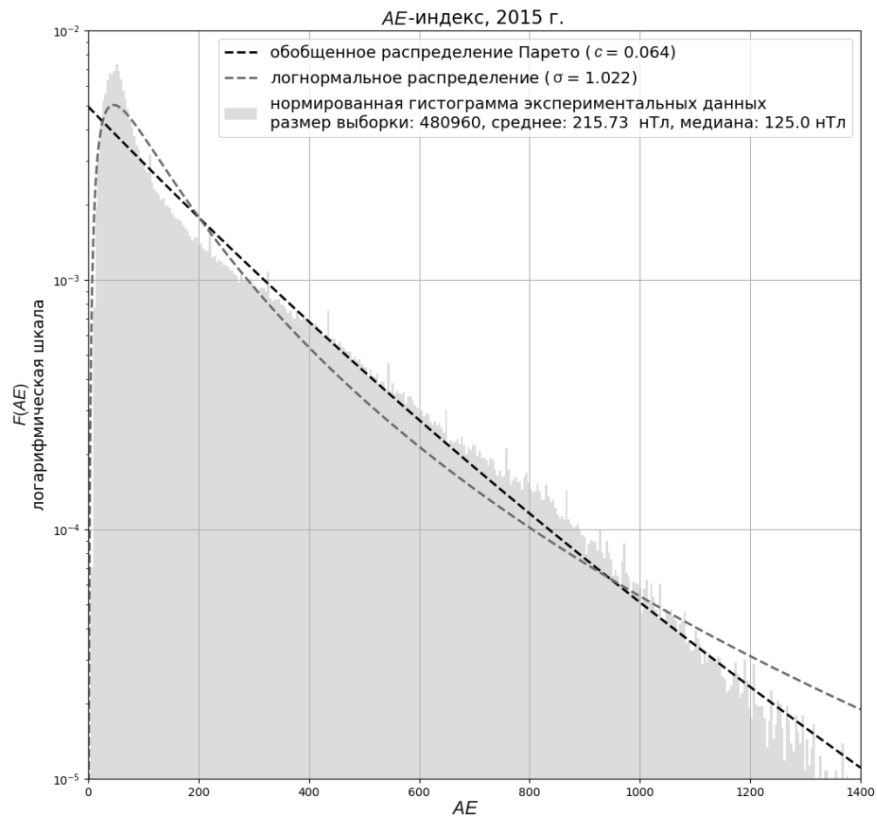


Рис. 3. Распределения плотности вероятности значений AE-индекса за 2015 г.

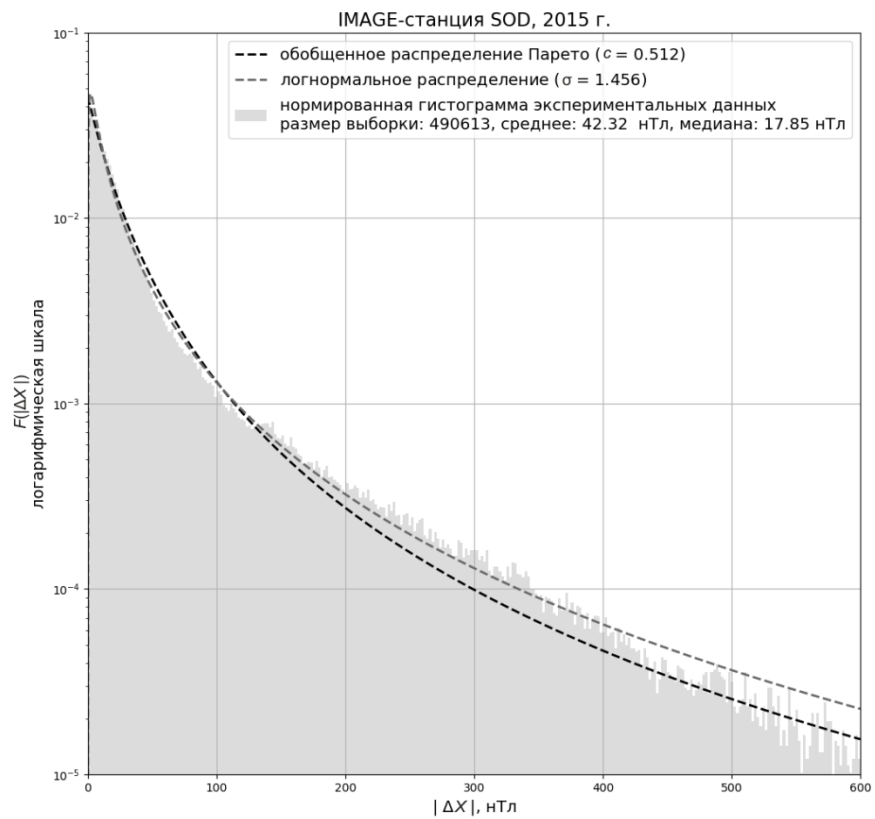


Рис. 4. Распределения плотности вероятности значений возмущения геомагнитного поля $|\Delta X|$ для станции SOD за 2015 г.

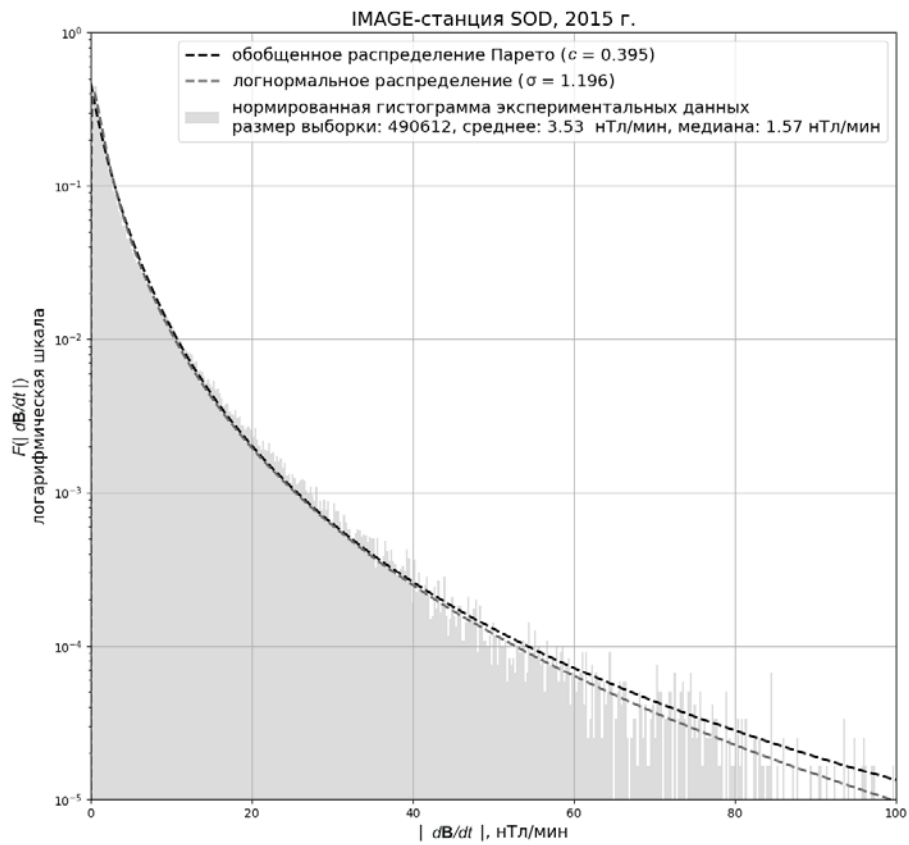


Рис. 5. Распределения плотности вероятности значений варибельности геомагнитного поля $|dB/dt|$ для станции SOD за 2015 г.

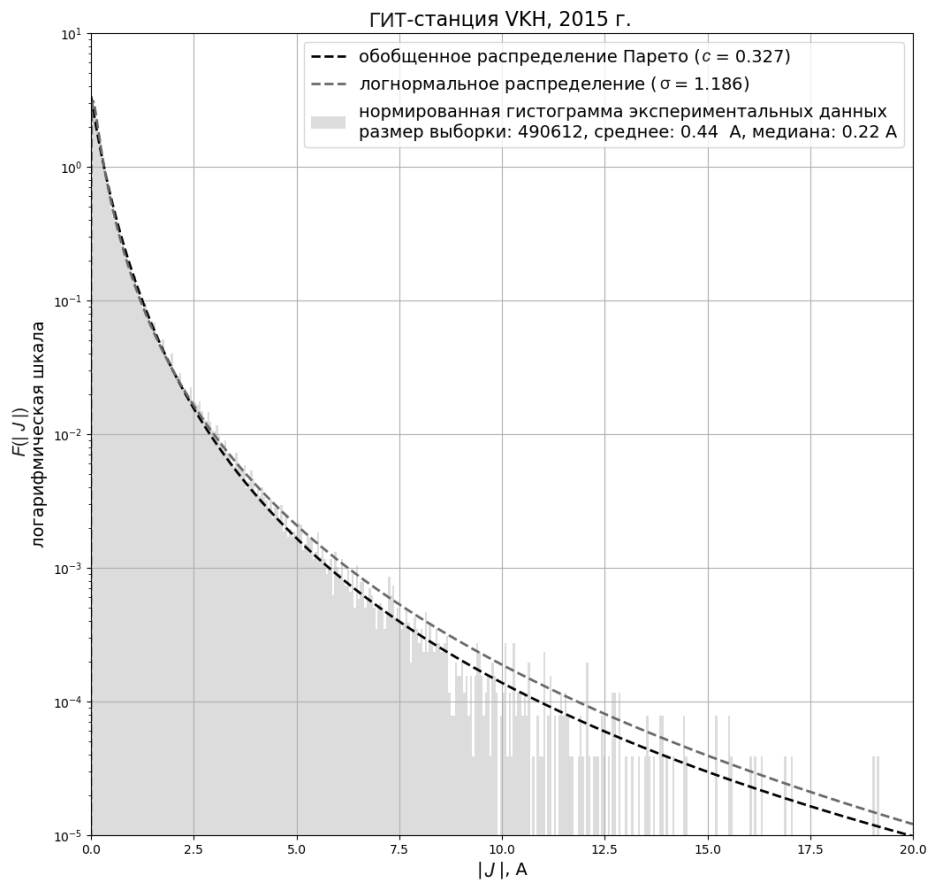


Рис. 6. Распределение плотности вероятности значений ГИТ для станции VKH за 2015 г.

Таблица 3

Критерий Колмогорова для распределений геомагнитных вариаций и ГИТ

Распределение	Временной ряд	AE	$ X $	$ d\mathbf{B}/dt $	$ J $
логнормальное		0.0558	0.0342	0.0249	0.0185
обобщенное Парето		0.0795	0.0206	0.0647	0.0649

описывает статистику экспериментальной выборки (табл. 3).

Таким образом, согласно табл. 3, можно сделать вывод о том, что статистика распределения значений $|\Delta X|$ достаточно хорошо описывается обобщенным распределением Парето, а AE -индексу, варибельности поля и ГИТ лучше соответствует логнормальное распределение (согласно [Большев, Смирнов, 1983] предложенные гипотезы могут быть отвергнуты с уровнем значимости, не превышающим 0.01 %). Заметим, что многочисленные работы по изучению статистических свойств AE -индекса (например, [Consolini, de Michelis, 1998]) указывают, что наилучшим образом распределение AE -индекса моделируется суммой двух логнормальных распределений, одно из которых соответствует спокойным интервалам, другое — суббуревым периодам.

Тот факт, что распределения вероятности как $F(|J|)$, так и $F(|d\mathbf{B}/dt|)$ имеет вид близкий к логнормальному, может свидетельствовать о том, что это распределение формируется в результате мультипликативного стохастического воздействия. Интересно, что и турбулентность околоземной плазмы, по данным многих наблюдений, часто описывается логнормальным распределением [Козак и др., 2012]. Таким образом, подобное совпадение может указывать на то, что турбулентность околоземной плазмы в значительной степени ответственна за варибельность геомагнитного поля и, следовательно, за появление ГИТ.

По-видимому, с помощью планетарных индексов (типа AE) нельзя выявить условия, при которых возникают экстремальные значения токов на выбранной подстанции. Такие индексы, возможно, могут быть полезны для оценки суммарного ГИТ во всех узлах региональной ЛЭП. Более точно ГИТ могут характеризовать региональные геомагнитные индексы вроде предлагаемого IE -индекса (IMAGE Electrojet Indicator, [<http://space.fmi.fi/image/www>]). Величина же локального ГИТ определяется не только локальной величиной $d\mathbf{B}/dt$ и геоэлектрическими условиями, но и пространственными соотношениями между размерами ЛЭП и масштабом быстрых геомагнитных возмущений [Ягова и др., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным за 2015 г. корреляцию между ГИТ и варибельностью компонент геомагнитного поля $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$ можно охарактеризовать как высокую ($R > 0.7$), а между ГИТ и магнитными возмущениями $|\Delta X|$, $|\Delta Y|$ и AE -индексом — как значимую ($0.5 < R < 0.7$) и в среднем за год, и в период магнитной бури. При этом коэффициенты корреляции $|J|$ с вариациями производных X - и Y -компонент оказались близки, что подтверждает отмеченную ранее

квазиизотропность быстрых вариаций производной геомагнитного поля $d\mathbf{B}/dt$ [Viljanen, 1997; Белаховский и др., 2018].

Суточные вариации средних значений варибельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ и интенсивности ГИТ имеют широкий ночной максимум, связанный с электроджетом, и широкий утренний максимум, предположительно обусловленный интенсивными геомагнитными пульсациями типа Pc5–Pi3.

Регрессионная линейная диагностическая модель, в качестве входных параметров которой использован параметр $|d\mathbf{B}/dt|$, предсказывает ГИТ умеренной величины со средней ошибкой ± 0.91 А, а модель, использующая AE -индекс, — с ошибкой на ~50 % больше. Большие значения ГИТ ($20 < |J| < 45$ А) возможно предсказать на базе параметра $|d\mathbf{B}/dt|$ со средней точностью ± 2.3 А.

Плотность вероятности значений временных рядов $|d\mathbf{B}/dt|$, $|J|$ и AE -индекса в наибольшей степени соответствует логнормальному распределению, а плотность вероятности значений $|\Delta X|$ — обобщенному распределению Парето.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-17-00121. Авторы выражают благодарность научным коллективам, осуществляющим функционирование сети магнитометров IMAGE [<http://space.fmi.fi/image>] и расчет AE - и PCN -индексов. Выражаем признательность рецензентам за добросовестное изучение работы и полезные критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики варибельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2018. № 1. С. 56–68. DOI: [10.7868/S0002333718010052](https://doi.org/10.7868/S0002333718010052).
- Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 535 с.
- Вахнина В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях. Тольяттинский государственный университет, 2012. 103 с.
- Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций Pi3 и Pc5 во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 1. С. 75–83.
- Козак Л.В., Савин С.П., Будаев В.П. и др. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 4. С. 470–481.
- Пилипенко В.А., Браво М., Романова Н.В. и др. Геомагнитный и ионосферный отклики на межпланетную ударную волну 17 марта 2015 г. // Физика Земли. 2018. № 5. С. 61–80. DOI: [10.1134/S0002333718050125](https://doi.org/10.1134/S0002333718050125).

Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГЕОС, 2007. 242 с.

Сушко В.А., Косых Д.А. Геомагнитные штормы. Угроза национальной безопасности России // Новости Электротехники. 2013. № 4 (82). С. 25–28.

Ягова Н.В., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П. и др. Частоты появления экстремальных значений производных по времени геомагнитного поля, потенциально опасных для промышленных электрических сетей, по данным многолетних наблюдений на сети IMAGE // Труды Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Апатиты, 19–23 сентября 2016. ПГИ РАН, 2016. С. 81–84.

Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н. и др. Геоиндуцированные токи и космическая погода: Pi3-пульсации и экстремальные значения производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля // Физика Земли. 2018. № 5. С. 89–103. DOI: [10.1134/S0002333718050137](https://doi.org/10.1134/S0002333718050137).

Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface // *Adv. Space. Res.* 1998. V. 22, iss. 1. P. 17–27. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X).

Chisham G., Freeman M.P. On the non-Gaussian nature of ionospheric vorticity // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, iss. 12, L12103. DOI: [10.1029/2010GL043714](https://doi.org/10.1029/2010GL043714).

Consolini G., de Michelis P. Non-Gaussian distribution function of AE-index fluctuations: evidence for time intermittency // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, iss. 21. P. 4087–4090. DOI: [10.1029/1998GL900073](https://doi.org/10.1029/1998GL900073).

Fiori R.A.D., Boteler D.H., Gillies D.M. Assessment of GIC risk due to geomagnetic sudden commencements and identification of the current systems responsible // *Space Weather.* 2014. V. 12, iss. 1. P. 76–91. DOI: [10.1002/2013SW000967](https://doi.org/10.1002/2013SW000967).

Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun—Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // *Space Weather.* 2005. V. 3, iss. 1, S08C01. DOI: [10.1029/2004SW000128](https://doi.org/10.1029/2004SW000128).

Kelly G.S., Viljanen A., Beggan C., Thomson A.W.P. Understanding GIC in the UK and French high voltage transmission systems during severe magnetic storms // *Space Weather.* 2017. V. 14, iss. 1. P. 99–114. DOI: [10.1002/2016SW001469](https://doi.org/10.1002/2016SW001469).

Pahud D.M., Rae I.J., Mann I.R., et al. Ground-based Pc5 ULF wave power: solar wind speed and MLT dependence // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71, N 10–11. P. 1082–1092. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.12.004).

Pirjola R., Pulkkinen A., Viljanen A. Studies of space weather effects on the Finnish natural gas pipeline and on the Finnish high-voltage power system // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31, iss. 4. P. 795–805. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00781-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00781-0).

Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., et al. Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios // *Space Weather.* 2012. V. 10, iss. 4, S04003. DOI: [10.1029/2011SW000750](https://doi.org/10.1029/2011SW000750).

Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M. Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula // *Proc. of 7th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology.* St. Petersburg, June 26–29, 2007. P. 291–293.

Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M., et al. Geomagnetically induced currents in the power systems of the Kola peninsula at solar minimum // *Proc. of 8th Intern. Symp. Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology.* St. Petersburg, 2009. P. 237–238.

Stauning P. Multi-station basis for Polar Cap (PC) indices: ensuring credibility and operational reliability // *J. Space Weather Space Climate.* 2018. V. 8, A07. 14 p. DOI: [10.1051/swsc/2017036](https://doi.org/10.1051/swsc/2017036).

Viljanen A. The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 631–634. DOI: [10.1029/97GL00538](https://doi.org/10.1029/97GL00538).

Viljanen A., Tanskanen E. Climatology of rapid geomagnetic variations at high latitudes over two solar cycles // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29. P. 1783–1792. DOI: [10.5194/angeo-29-1783-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1783-2011).

Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 725–733. DOI: [10.5194/angeo-24-725-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006).

Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Solar wind coupling and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A7, 1298. DOI: [10.1029/2002JA009627](https://doi.org/10.1029/2002JA009627).

URL: <http://eurisgic.org> (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

URL: www.geo.fmi.fi/image (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir> (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

URL: <http://www.geophys.aari.ru> (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

URL: <http://space.fmi.fi/image/www> (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

URL: <http://space.fmi.fi/image> (дата обращения 9 сентября 2018 г.).

REFERENCES

Belakhovsky V.B., Sakharov Y.A., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. Characteristics of the variability of a geomagnetic field for studying the impact of the magnetic storms and substorms on electrical energy systems. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2018. vol. 54, no. 1, pp. 52–65. DOI: [10.1134/S1069351318010032](https://doi.org/10.1134/S1069351318010032).

Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Adv. Space. Res.* 1998, vol. 22, iss. 1, pp. 17–27. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X).

Bolshev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 416 p. (In Russian).

Chisham G., Freeman M.P. On the non-Gaussian nature of ionospheric vorticity. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, iss. 12, L12103. DOI: [10.1029/2010GL043714](https://doi.org/10.1029/2010GL043714).

Consolini G., de Michelis P. Non-Gaussian distribution function of AE-index fluctuations: evidence for time intermittency. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, iss. 21, pp. 4087–4090. DOI: [10.1029/1998GL900073](https://doi.org/10.1029/1998GL900073).

Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. *Okonnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza signalov* [Window Functions for Harmonic Analysis of Signals]. Moscow, Technosfera Publ., 2014, 112 p. (In Russian).

Fiori R.A.D., Boteler D.H., Gillies D.M. Assessment of GIC risk due to geomagnetic sudden commencements and identification of the current systems responsible. *Space Weather.* 2014, vol. 12, iss. 1, pp. 76–91, DOI: [10.1002/2013SW000967](https://doi.org/10.1002/2013SW000967).

Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun—Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms. *Space Weather.* 2005, vol. 3, iss. 1, S08C01. DOI: [10.1029/2004SW000128](https://doi.org/10.1029/2004SW000128).

Kelly G.S., Viljanen A., Beggan C., Thomson A.W.P. Understanding GIC in the UK and French high-voltage transmission systems during severe magnetic storms. *Space Weather.* 2017, vol. 15, iss. 1, pp. 99–114. DOI: [10.1002/2016SW001469](https://doi.org/10.1002/2016SW001469).

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V. Spatio-temporal dynamics of geomagnetic pulsations Pi3 and Pc5 during extreme

magnetic storms in October 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005, vol. 45, no. 1, pp. 71–79.

Kozak L.V., Savin S.P., Budaev V.P., Pilipenko V.A., Lezhen L.A. Character of turbulence in the boundary regions of the Earth's magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, no. 4, pp. 445–455. DOI: [10.1134/S0016793212040093](https://doi.org/10.1134/S0016793212040093).

Pisarenko V.F., Rodkin M.V. *Raspredeleniya s tyazhelymi khvostami: prilozheniya k analizu katastrof* [Distributions with Heavy Tails: Applications to the Analysis of Disasters]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 242 p. (In Russian).

Pahud D.M., Rae I.J., Mann I.R., Murphy K.R., Amalraj V. Ground-based Pc5 ULF wave power: solar wind speed and MLT dependence. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009, vol. 71, iss. 10–11, pp. 1082–1092. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.12.004).

Pilipenko V.A., Bravo M., Romanova N.V., Kozyreva O.V., Samsonov S.N., Sakharov Y.A. Geomagnetic and ionospheric responses to the interplanetary shock wave of March 17, 2015. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 721–740. DOI: [10.1134/S1069351318050129](https://doi.org/10.1134/S1069351318050129).

Pirjola R., Pulkkinen A., Viljanen A. Studies of space weather effects on the Finnish natural gas pipeline and on the Finnish high-voltage power system. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 31, iss. 4, pp. 795–805. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00781-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00781-0).

Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., Beggan C., Thomson A.W.P. Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios. *Space Weather*. 2012, vol. 10, iss. 4, S04003. DOI: [10.1029/2011SW000750](https://doi.org/10.1029/2011SW000750).

Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M. Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula. *Proc. of 7th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. St. Petersburg, June 26–29, 2007, pp. 291–293.

Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M., Katalov Yu.V., Kudryashova N.V. Geomagnetically induced currents in the power systems of the Kola peninsula at solar minimum. *Proc. of 8th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. St. Petersburg, 2009, pp. 237–238.

Stauning P. Multi-station basis for Polar Cap (PC) indices: ensuring credibility and operational reliability. *J. Space Weather Space Climate*. 2018, vol. 8, A07, 14 p. DOI: [10.1051/swsc/2017036](https://doi.org/10.1051/swsc/2017036).

Sushko V.A., Kosykh D.A. Geomagnetic storms. The Threat to Russia's National Security. *Novosti elektrotehniki* [News of Electrical Engineering]. 2013, no. 4 (82), pp. 25–28. (In Russian).

Viljanen A. The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, pp. 631–634. DOI: [10.1029/97GL00538](https://doi.org/10.1029/97GL00538).

Viljanen A., Tanskanen E. Climatology of rapid geomagnetic variations at high latitudes over two solar cycles. *Ann. Geophys.* 2011, vol. 29, pp. 1783–1792. DOI: [10.5194/angeo-29-1783-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1783-2011).

Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, pp. 725–733. DOI: [10.5194/angeo-24-725-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006).

Vakhnina V.V. *Modelirovanie rezhimov raboty silovyykh transformatorov sistem elektro-snabzheniya pri geomagnitnykh buryakh* [Modeling of Operation Modes of Power Transformers of Power Supply Systems in Geomagnetic Storms]. Togliatti, Togliatti State University, 2012. 103 p. (In Russian).

Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A7, 1298. DOI: [10.1029/2002JA009627](https://doi.org/10.1029/2002JA009627).

Yagova N.V., Lamondodog A.D., Gusev Yu.P., Pilipenko V.A., Fedorov E.N. Frequencies of occurrence of extreme values of time-derivative geomagnetic fields, potentially dangerous for industrial electric networks, according to data of long-term observations on the IMAGE network. *Proc. of the All-Russian Conference "Heliogeophysical Research in the Arctic"*. Apatity, September 19–23, 2016, pp. 81–84. (In Russian).

Yagova N.V., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Lhamdontong A.D., Gusev Yu.P. Geomagnetically induced currents and space weather: Pi3 pulsations and extreme values of the time derivatives of the horizontal components of the geomagnetic field. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 749–763. DOI: [10.1134/S1069351318050130](https://doi.org/10.1134/S1069351318050130).

URL: <http://eurisgic.org> (accessed September 9, 2018).

URL: www.geo.fmi.fi/image (accessed September 9, 2018).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir> (accessed September 9, 2018).

URL: <http://www.geophys.aari.ru> (accessed September 9, 2018).

URL: <http://space.fmi.fi/image/www> (accessed September 9, 2018).

URL: <http://space.fmi.fi/image> (accessed September 9, 2018).

Как цитировать эту статью

Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврального электроджета и геоиндуцированных токов. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 48–58. DOI: [10.12737/szf-51201905](https://doi.org/10.12737/szf-51201905).