

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА НАЗЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

SPACE WEATHER IMPACT ON GROUND-BASED TECHNOLOGICAL SYSTEMS

В.А. Пилипенко

*Институт физики Земли РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru
Геофизический Центр РАН,
Москва, Россия*

V.A. Pilipenko

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

Аннотация. Предлагаемый впервые в отечественной научной литературе обзор посвящен различным аспектам проблемы воздействия космической погоды (КП) на наземные технологические системы. Особое внимание уделено нарушениям в работе линий электропередач (ЛЭП), железнодорожной автоматики и трубопроводов, вызванным геоиндуцированными токами (ГИТ) при возмущениях геомагнитного поля. В обзоре даны сведения об основных характеристиках вариабельности геомагнитного поля и быстрых вариациях поля при различных проявлениях КП. Излагаются основы моделирования возмущений геоэлектрического поля, основанные на алгоритмах магнитотеллурического зондирования. Рассмотрены подходы к оценке возможных экстремальных величин ГИТ. Собраны сведения об экономических эффектах КП и ГИТ. Рассказано о современном состоянии и перспективах прогноза КП, а также об оценке риска для технологических систем при воздействии ГИТ. Следует подчеркнуть, что хотя в космической геофизике активно разрабатываются различные модели предсказания интенсивности магнитных бурь и вызванных ими геомагнитных возмущений по наблюдениям межпланетной среды, эти модели не могут быть непосредственно применены для предсказания интенсивности и положения ГИТ, так как описание вариабельности геомагнитного поля требует разработки отдельных моделей. Выявление тонкой структуры быстрых геомагнитных вариаций во время бурь и суббурь и вызываемых ими всплесков ГИТ оказалось важным не только с практической точки зрения, но и для развития фундаментальных представлений о динамике околоземного космического пространства (ОКП). В отличие от узкоспециальных работ по геофизическим аспектам вариаций геомагнитного поля и инженерным аспектам воздействия ГИТ на работу промышленных трансформаторов обзор рассчитан на более широкую научно-техническую аудиторию, без потери научного уровня изложения. Иными словами, геофизическая часть написана для инженеров-энергетиков, а инженерная — для геофизиков. Несмотря на явную прикладную направленность рассматриваемых исследований, эти работы не сводятся к чисто инженерному применению результатов космической геофизики для расчета возможных рисков для технологических систем, а ставят и ряд принципиальных научных проблем.

Abstract. This review, offered for the first time in the Russian scientific literature, is devoted to various aspects of the problem of the space weather impact on ground-based technological systems. Particular attention is paid to hazards to operation of power transmission lines, railway automation, and pipelines caused by geomagnetically induced currents (GIC) during geomagnetic disturbances. The review provides information on the main characteristics of geomagnetic field variability, on rapid field variations during various space weather manifestations. The fundamentals of modeling geoelectric field disturbances based on magnetotelluric sounding algorithms are presented. The approaches to the assessment of possible extreme values of GIC are considered. Information about economic effects of space weather and GIC is collected. The current state and prospects of space weather forecasting, risk assessment for technological systems from GIC impact are discussed. While in space geophysics various models for predicting the intensity of magnetic storms and their related geomagnetic disturbances from observations of the interplanetary medium are being actively developed, these models cannot be directly used to predict the intensity and position of GIC since the description of the geomagnetic field variability requires the development of additional models. Revealing the fine structure of fast geomagnetic variations during storms and substorms and their induced GIC bursts appeared to be important not only from a practical point of view, but also for the development of fundamentals of near-Earth space dynamics. Unlike highly specialized papers on geophysical aspects of geomagnetic variations and engineering aspects of the GIC impact on operation of industrial transformers, the review is designed for a wider scientific and technical audience without sacrificing the scientific level of presentation. In other words, the geophysical part of the review is written for engineers, and the engineering part is written for geophysicists. Despite the evident applied orientation of the studies under consideration, they are not limited to purely engineering application of space geophysics results to the calculation of possible risks for technological systems, but also pose a number of fundamental scientific problems.

Keywords: space weather, geomagnetically induced currents, power transmission lines, transformers, pipelines, railways automation, magnetospheric storms, substorms, Pi3/Ps6 pulsations.

Ключевые слова: космическая погода, геоиндуцированные токи, линии электропередач, трансформаторы, трубопроводы, железнодорожная автоматика, магнитосферные бури, суббури, P₃/P₆-пульсации.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|------|--|-----|
| 1 | Негативное воздействие космической погоды на технологические системы | 74 |
| 1.1 | Энергетические системы | 74 |
| 1.2 | Кабельные линии, телефонные и телеграфные линии | 75 |
| 1.3 | Железнодорожное оборудование | 75 |
| 1.4 | Трубопроводы | 75 |
| 2 | Вариации геомагнитного и геоэлектрического полей во время различных проявлений космической погоды | 76 |
| 2.1 | Межпланетные ударные волны | 77 |
| 2.2 | Авроральные и полярные суббури | 77 |
| 2.3 | Локальные импульсные возмущения геомагнитного поля | 78 |
| 2.4 | Тонкая структура суббури: серии магнитных импульсов типа P ₆ /P ₃ | 79 |
| 2.5 | P ₅ пульсации | 79 |
| 2.6 | Статистические особенности варибельности геомагнитного поля dB/dt | 80 |
| 3 | Сбои в технологических системах, вызванные ГИТ | 82 |
| 3.1 | Нарушения в работе промышленных трансформаторов на авроральных широтах | 82 |
| 3.2 | ГИТ на средних и низких широтах | 83 |
| 3.3 | Сбои в работе железнодорожного оборудования | 83 |
| 3.4 | Трубопроводы | 84 |
| 4 | Методы измерения ГИТ | 85 |
| 4.1 | ЛЭП «Северный транзит» | 85 |
| 4.2 | Метод дифференциальной магнитометрии | 86 |
| 4.3 | Гармоники электросети | 87 |
| 4.4 | ГИТ в электрических сетях и ОНЧ-радиоизлучение | 87 |
| 5 | Моделирование возмущений геоэлектрического поля и ГИТ | 87 |
| 5.1 | Методы МТ-зондирования | 87 |
| 5.2 | Вариации геомагнитного и теллурического полей как источник ГИТ | 88 |
| 5.3 | Карты возможных значений ГИТ | 90 |
| 5.4 | Метод переходных функций для оценки ГИТ в заданных системах при вариациях геомагнитного поля | 90 |
| 5.5 | Модели для вычисления ГИТ в трубопроводе и потенциала труба—почва | 90 |
| 5.6 | Влияние резких неоднородностей геоэлектрической проводимости на ГИТ | 91 |
| 6 | Оценки возможных экстремальных величин ГИТ | 92 |
| 6.1 | Статистические методы оценки экстремальных событий | 92 |
| 6.2 | Оценки экстремальных значений варибельности геомагнитного поля и теллурических полей | 93 |
| 7 | РС-индекс геомагнитной активности и сбои в энергетических системах | 93 |
| 8 | Экономические эффекты ГИТ | 94 |
| 9 | ГИТ в токопроводящих системах и силовые трансформаторы | 94 |
| 10 | Развитие физических и статистических моделей для оценки риска негативного воздействия ГИТ | 96 |
| 10.1 | Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов | 96 |
| 10.2 | Регрессионная модель геоиндуцированных токов | 97 |
| 10.3 | Статистические распределения вариаций ГИТ и геомагнитного поля | 97 |
| 11 | Прогноз космической погоды, положения аврорального овала и риска для энергетических систем с помощью глобального МГД-моделирования | 98 |
| 11.1 | Компьютерные модели оперативного прогноза рисков ГИТ | 100 |
| 11.2 | Прогностические модели интенсивности и положения аврорального овала | 101 |
| 12 | Заключение: задачи дальнейших исследований | 102 |

1. НЕГАТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Исследования состояния околоземной космической среды, для краткости называемое космической погодой (КП), т. е. состояния электромагнитных полей, плазмы и потоков частиц в околоземном космическом пространстве (ОКП) выходят за рамки чисто академического интереса по мере возрастания количества проблем, связанных с нарушениями нормального функционирования спутниковых и наземных технологических систем [Space Weather — Research Towards Applications in Europe, 2007]. К ним относятся сбои спутниковых и авиационных систем, частичные или полные отключения электроэнергии, нарушения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС), помехи в радиосвязи [Space Storms and Space Weather Hazards, 2000; Extreme Space Weather: Impacts on Engineered Systems and Infrastructure, 2013]. Наиболее активные проявления КП, такие как возмущения геомагнитного поля и ионосферы, возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в проводящих конструкциях, сбои в системах радиосвязи и навигационных спутниковых систем, усиление коррозии в трубопроводах и т. п., наблюдаются в высоких широтах [Space Weather, 2001].

При этом, чем шире внедряются передовые технологические системы, тем чувствительнее для экономики и жизнедеятельности человечества становятся их сбои и выходы из строя. Расширение сетей магистральных линий электропередач (ЛЭП) сопровождается повышением вероятности нарушений под воздействием ГИТ, наводимых геомагнитными бурями и суббурями [Boteler, 2001]. Известны многочисленные примеры катастрофических последствий КП, имевшие место по всему миру [Lanzerotti, 1979, 1983, 2001; Bolduc, 2002]. Изменчивость факторов КП и их негативное воздействие на технологическую среду являются естественной нормой, которые невозможно избежать, но необходимо знать и учитывать [Pirjola et al., 2005]. При решении инженерных проблем знание характерных параметров КП и диапазона их изменений необходимо для усовершенствования уже используемых технических средств и грамотной разработки новых [Veeramany et al., 2016].

Космическую погоду в основном определяют солнечные вспышки, корональные выбросы массы (coronal mass ejections), а также высокоскоростные потоки плазмы из солнечных дыр (corotating interaction regions), вызывающие геомагнитные бури и суббури. Общее количество энергии, выделяющейся при магнитной буре средней интенсивности, составляет около 1400 ГВт, что почти вдвое превышает мощность всех электростанций США. Высокая активность ведущихся в мире исследований по проблемам КП обусловлена, с одной стороны, фундаментальным научным интересом к проблеме изучения

солнечно-земных связей и геофизических оболочек как единой динамической системы, с другой — необходимостью обеспечения устойчивой работы технологических систем, радиосвязи, радиолокации и навигации.

1.1. Энергетические системы

Частота выбросов солнечной плазмы в межпланетное пространство увеличивается в периоды максимума солнечного цикла, но не прекращается и в периоды минимума. Выбросы солнечной плазмы, пролетающие мимо Земли, деформируют ее защитное магнитное поле, вызывая усиление электромагнитных полей как в ближнем космосе, так и у земной поверхности [Love, 2008]. Индуцируемые в поверхностных слоях земной коры вариации геоэлектрических токов замыкаются через заземленные энергетические системы, вызывая появление ГИТ [Boteler, Pirjola, 2017, 2019]. В свою очередь, ГИТ приводят к перепадам напряжения, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП [Pirjola, 1985a, b; Успенский, 2017; Вахнина и др., 2018]. В настоящее время ГИТ стали постоянной угрозой для высокотехнологичных обществ, представляя серьезную опасность для региональных высоковольтных электрических сетей, многие из которых пересекают национальные границы [Gaunt, 2016].

Современные энергетические сети с крайне сложной геометрией, располагающиеся до высоких широт, оказываются, по существу, гигантской антенной, электромагнитно-сопряженной с токами ионосферы Земли [Piccinelli, Krausmann, 2014]. В заземленных энергетических сетях наблюдались токи до 300 А, в то время как ГИТ с интенсивностью всего несколько ампер достаточны для того, чтобы повлиять на работу трансформатора [Overbye et al., 2013]. Хотя возмущения геомагнитного поля и ионосферы, приводящие к возбуждению ГИТ в проводящих конструкциях, происходят в основном в авроральных высоких широтах [Mullys et al., 2014], в последнее время обнаружено, что опасные величины ГИТ могут наблюдаться на средних и даже низких широтах [Beggan et al., 2013].

Расчет возможных уровней ГИТ при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сетей для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, является крайне актуальной проблемой [Sokolova et al., 2021]. Решение задач по снижению риска возникновения и уменьшению последствий катастроф природного происхождения не сводится просто к инженерному применению результатов космической физики для расчета ГИТ в технологических системах, а требует выяснения физической природы некоторых магнитосферно-ионосферных явлений [Pulkkinen et al., 2017]. Необходим, с одной стороны, глобальный планетарный подход к описанию геомагнитных возмущений, с другой — изучение действия ГИТ в каждой конкретной системе [Hargood, 2012; Viljanen, Tanskanen, 2011; Viljanen et al., 2013].

В процессе индустриального развития резко возрастают длина и межсвязность энергетических линий, что увеличивает подверженность сетей негативному воздействию ГИТ. Для того чтобы передавать большую энергию на дальние расстояния, строятся все более протяженные ЛЭП. Однако такие линии особенно подвержены воздействию больших ГИТ. Это обстоятельство делает электрические сети все более восприимчивыми к возмущениям КП. Так, в Канаде и США уровни ГИТ стали в 2–3 раза выше, чем наблюдались 20 лет назад при магнитных бурях той же интенсивности [Molinski, 2002]. Кроме того, сбои в электросети могут быть вызваны не только экстремальными возмущениями КП, но также преждевременным старением компонентов высоковольтных трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренных по величине ГИТ, которые обычно принято считать безопасными [Beland, Small, 2005]. На последствия ГИТ может влиять и нагрузка сетей. Так, Wik et al. [2009] показали, что магнитная буря 13–14 июля 1982 г. привела бы к серьезным последствиям, если бы не благоприятные условия в энергетической сети благодаря пониженной летней нагрузке.

Нарушения работы ЛЭП являются наиболее очевидными, но не единственными последствиями ГИТ. Несбалансированные трансформаторы с частично насыщенными сердечниками увеличивают реактивную составляющую и содержание гармоник поданного питания от электростанций [Ариллага и др., 1990]. Следовательно, эффективность распределения мощности уменьшается, в результате чего мощность, доступная для потребителей, может уменьшиться. В крайних случаях электрические сети могут потерять стабильность и выйти из строя, вызывая масштабные отключения электроэнергии.

Известно множество примеров серьезных последствий воздействия КП на протяженные высоковольтные электрические сети [Vozoki, 1996; Qiu et al., 2015]. ГИТ вызвали насыщение, рост гармоник, перегрев и даже повреждение высоковольтных трансформаторов. Наиболее интенсивные токи (более сотни ампер) были измерены в нейтральных выводах трансформаторов на авроральных широтах во время магнитных бурь и суббурь [Viñanen et al., 2014]. Однако не существует общего правила, насколько сильным должен быть ГИТ, чтобы представлять опасность для энергетических систем, поскольку существует много типов трансформаторов с различной чувствительностью к квази-постоянным токам. Для некоторых силовых трансформаторов требуется всего несколько ампер, чтобы вывести работу трансформатора из линейного режима [Вахнина, 2012; Вахнина и др., 2012; Вахнина, Кретов, 2012a].

Постоянное расширение высоковольтных электрических сетей, рост связи между ними, увеличение нагрузки и переход на низкоомные линии электропередачи с более высоким напряжением приводят к увеличению вероятности аварий во время возмущений КП. Однако катастрофические сбои не обязательны для того, чтобы оказать ощутимое эко-

номическое влияние на функционирование оптовых рынков электроэнергии. Поэтому, даже если оборудование для энергетической инфраструктуры и не разрушено во время сильных возмущений КП, ГИТ в региональных энергосистемах могут все же оказывать заметное влияние на экономику в целом [Forbes, 2004].

1.2. Кабельные линии, телефонные и телеграфные линии

Через ГИТ КП проявляет себя в работе и других технологических систем — телеграфных линий, подводных кабелей и железных дорог [Lanzerotti et al., 1995]. Более ста лет назад магнитная буря 17 июня 1915 г. нарушила работу телеграфных служб в большей части мира. В дальнейшем опасность ГИТ для магистральных и морских кабельных линий, телефонных и телеграфных линий неоднократно подтверждалась [Anderson et al., 1974; Medford et al., 1981; Meloni et al., 1983; Boteler, Jansen van Beek, 1999].

1.3. Железнодорожное оборудование

В то время как в большинстве исследований, связанных с КП, основное внимание уделяется влиянию на электрические сети, гораздо меньше внимания обращается на нарушения работы железнодорожного сектора. Однако аномалии в системах сигнализации и контроля поездов, связанные с этим явлением, были документированы [Liu et al., 2016; Eroshenko et al., 2010; Сахаров, др., 2009]. Тем не менее, механизм влияния сильных геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики пока не выяснен [Трищенко, 2008]. Кроме того, работа железнодорожных систем зависит от других, потенциально подверженных воздействию КП технологий, таких как энергоснабжение, связь, системы позиционирования и синхронизации времени. Поскольку при сильных бурях воздействие возмущений распространяется достаточно широко и носит планетарный характер, необходимы прогноз КП и разработка мер по ослаблению прямых и косвенных воздействий возмущений на системы и службы железных дорог [Krausmann et al., 2015].

1.4. Трубопроводы

Космическая погода и вызванные ей глобальные электромагнитные возмущения представляют опасность для трубопроводов, особенно для тех, которые расположены в зоне интенсивной геомагнитной активности [Pulkkinen et al., 2001a, b; Gummow, Eng, 2002]. Эффекты воздействия на трубопроводы, создаваемые геомагнитными возмущениями, не являются мгновенными, а оказывают кумулятивное воздействие из-за подверженности коррозионному повреждению [Boteler, Cookson, 1986; Martin, 1993; Boteler, Trichtenko, 2015; Marshall et al., 2010]. Электрокоррозия представляет собой электрохимический процесс, возникающий, когда ток течет из трубы в почву. Для предотвращения коррозии стальные трубопроводы покрыты изолирующим покрытием и оборудованы системой катодной защиты. Катодная защита трубопроводов от электрокоррозии поддер-

живает отрицательный потенциал порядка -1 В относительно земли. Во время же магнитной бури в ноябре 2004 г. на газопроводе в Финляндии наблюдались отклонения потенциала труба—почва в диапазоне от 1.6 В до 4 мВ [Pirjola et al., 2003].

Под действием ГИТ катодная защита трубопроводов, поддерживающая отрицательный потенциал трубы относительно земли, искажается, что резко увеличивает скорость коррозии и приводит к сокращению срока эксплуатации трубопровода. Высокочастотные (50–60 Гц) электрические поля в трубопроводах могут наводиться также проходящими рядом ЛЭП. Для защиты от ГИТ трубопроводы разбиваются на более короткие секции изолирующими вставками. Это уменьшает экстремально возможные значения потенциала между трубой и землей, но увеличивает число участков с ненулевым потенциалом, что повышает риск коррозии.

Принципиальное отличие трубопроводов от ЛЭП состоит в том, что они заземлены непрерывно. Трубопровод, имеющий заземление во многих точках, фактически шунтирует электрическое поле, наведенное на поверхности земли. Компонента электрического поля, параллельная трубопроводу, может вызывать в нем ток до 100 А [Viljanen et al., 2006b]. Вблизи торцов трубы, насосных станций, в местах соединения труб различного диаметра, при изменении направления трубы меняется распределение токов растекания, перераспределяется потенциал труба—почва, что может существенно сказаться на скорости коррозии и работе катодной защиты. Подобные эффекты могут возникать также в местах локального изменения проводимости грунта [Viljanen, 1989; Sackinger, 1991; Fernberg et al., 2007], а также при переходе трубопровода из почвы в море. Для трубопроводов, расположенных на дне моря (типа «Северный поток-2»), окружающей средой служит хорошо проводящая морская вода. В таких системах ГИТ не зарегистрированы, однако воздействие ГИТ следует ожидать и в этом случае.

Таким образом, влияние геомагнитных вариаций следует учитывать при проектировании трубопроводов, выборе и организации системы катодной защиты [Henriksen et al., 1978; Lundstend, 1992]. Поскольку воздействие ГИТ может проявляться как непосредственно при развитии возмущения, так и иметь кумулятивный характер, целесообразно организовать систему непрерывного контроля уровня ГИТ и потенциалов труба—почва на ряде промежуточных станций и систему непрерывной регистрации магнитных вариаций. Информация о реакции отдельных участков трубопровода на магнитные возмущения в ходе эксплуатации трубопровода позволит выбрать оптимальную схему заземления и управления катодной защитой. Для оценки степени воздействия геомагнитных и геоэлектрических полей на конкретную систему целесообразно составить карту распределения вероятности отклонения полей от спокойного уровня [Trichtchenko, Boteler, 2002]. Поскольку в России весьма значительна протяженность действующих трубопроводов, связывающих арктические регионы со средними широтами, проблема негативного воздействия ГИТ на трубопроводы требует специального внимания.

2. ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ ВО ВРЕМЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Одним из наиболее значимых факторов КП является электрический ГИТ в системах технологических проводников, связанный с резкими изменениями геомагнитного поля dB/dt [Knipp, 2015]. Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности вызываются протяженным авроральным электроджетом, создающим на земной поверхности магнитные возмущения, ориентированные в широтном (СЮ) направлении. Поэтому широко распространены представления и расчетные модели, в которых основным источником ГИТ являются вариации интенсивности аврорального электроджета, индуцирующие ГИТ в долготном (ВЗ) направлении [Hakkinen, Pirjola, 1986; Viljanen, Pirjola, 1994; Boteler, Pirjola, 1998; Boteler et al., 2000]. На основании этого считалось, что магнитные возмущения представляют опасность преимущественно для технологических систем, вытянутых в долготном направлении [Pirjola, 1982].

Однако в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, существенный вклад могут вносить мелкомасштабные ионосферные токовые структуры [Viljanen, 1997; Viljanen et al., 2001]. Они создают почти изотропные возмущения горизонтальных магнитных полей на земной поверхности. Данные о возбуждении и развитии ГИТ в реальных проводящих системах представляют фундаментальный интерес с точки зрения тонкой структуры развития возмущений и имеют практическую значимость в плане защиты технологических систем от воздействия КП.

Ниже будут приведены конкретные примеры различных типов возмущений КП, которые могут индуцировать в ЛЭП токи большой интенсивности. Анализ отдельных событий показывает, что усиление крупномасштабного аврорального электроджета в момент взрывного начала суббури, геомагнитные пульсации типа P₁₃/P_{s6} и P_{c5}, дневные внезапные импульсы и ночные спорадические магнитные импульсы могут вызывать значительные возрастания ГИТ. Энергия таких импульсных или квазипериодических возмущений много ниже, чем энергия магнитосферных бурь или суббурь, однако быстро меняющиеся поля таких возмущений могут вызывать всплески ГИТ значительной величины. В общем, амплитуды геомагнитных вариаций убывают с частотой, тогда как ожидается, что величины индуцированного электрического поля будут расти с частотой. Следовательно, отклик ГИТ на геомагнитное возмущение, который представляет собой комбинацию обоих факторов, должен иметь максимум на некоторых частотах. Исследования всплесков ГИТ показали, что этот характерный временной масштаб составляет примерно 2–10 мин, т. е. попадает в частотный диапазон пульсаций P_{c5}/P₁₃, находясь на низкочастотном интервале ультранизкочастотного (УНЧ) диапазона.

2.1. Межпланетные ударные волны

Среди большого разнообразия МГД-возмущений в ОКП особое внимание уделяется изучению внезапного начала бури (storm sudden commencement, SSC), вызванного взаимодействием межпланетной ударной волны с магнитосферой. Импульсное воздействие ударной волны может в течение очень короткого времени принести значительное количество энергии и импульса в магнитосферу. Импульсные SSC возмущения являются предвестниками сильных геомагнитных бурь. Воздействие ударной волны на геомагнитное поле имеет важный практический аспект в качестве источника ГИТ [Belakhovsky et al., 2017]. Влияние ГИТ на энергетические системы наблюдалось при $dB/dt > 100$ нТл/мин [Карпенман, 1996]. Некоторые сбои энергосистем были связаны с появлением SSC еще до начала главной фазы магнитной бури [Zhang et al., 2015]. Например, разрушение трансформатора энергосистемы в Новой Зеландии [Béland, Small, 2005] совпало с SC. Хотя возмущение ΔB , связанное с SC, относительно мало по сравнению с ΔB во время главной фазы бури или суббури, величина dB/dt может быть достаточно большой, чтобы индуцировать опасные ГИТ в энергетических системах. При этом изменение магнитного поля dB/dt при SSC не связано однозначно с интенсивностью последующей магнитной бури [Fiogi et al., 2014].

Благодаря глобальному характеру воздействия межпланетной ударной волны на геомагнитное поле, величины dB/dt на экваторе могут быть сопоставимы с уровнями в высокоширотных областях [Carter et al., 2015]. На приэкваториальных широтах существенным для развития индукционных эффектов может оказаться влияние экваториального электроджета. Во время SSC бури 17 февраля 1993 г. пиковые значения геоэлектрического поля достигали 300 мВ/км на геомагнитной широте $\sim 5^\circ$ [Dombia et al., 2017].

В качестве типичного примера можно привести всплеск в системе регистрации ГИТ в ЛЭП на Кольском полуострове во время SSC 17 марта 2015 г. (рис. 1) [Пилипенко и др., 2018]. В момент воздействия на земную магнитосферу межпланетной ударной волны, которое проявилось на земной поверхности в виде импульса SSC в ~ 06 UT, резкий всплеск ГИТ произошел на станциях системы «Северный транзит». Изменения ГИТ в пункте VKH оказываются подобны изменениям производной магнитного поля dX/dt на близкой магнитной станции IVA (~ 10 нТл/с). Размах вариаций ГИТ, вызванных SSC (~ 55 А), примерно в два раза выше, чем ГИТ (< 30 А) во время последующих интенсификаций суббури, хотя амплитуда SSC (~ 200 нТл) меньше амплитуды связанной с суббурей магнитной бухты (~ 1000 нТл). Это согласуется с более высокой амплитудой dX/dt во время SSC по сравнению с тем, что наблюдается при интенсификации суббури в ~ 13 UT и ~ 17 UT.

Таким образом, такое явление КП, как SSC, может давать очень большие значения dB/dt на широтах от авроральной области до геомагнитного экватора.

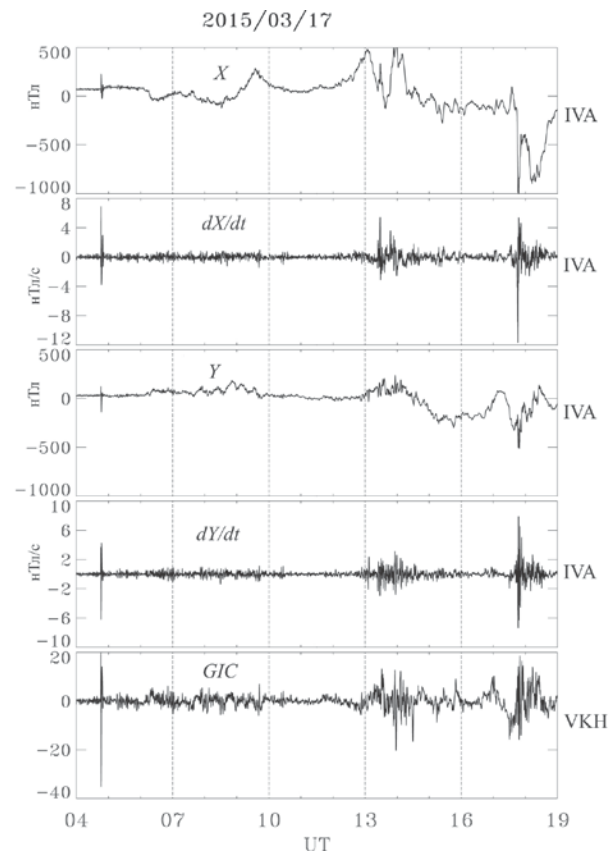


Рис. 1. Вариации магнитного поля (X -компонента) на ст. IVA, производной dX/dt ; то же самое для Y -компоненты; величины ГИТ на подстанции VKH во время магнитной бури 17 марта 2015 г.

Для операторов ЛЭП SSC проявляется как короткое замыкание в линии. Воздействие SSC может быть значительным фактором, влияющим на устойчивость передачи электроэнергии.

2.2. Авроральные и полярные суббури

В отличие от планетарного возмущения, такого как магнитная буря, суббури развиваются только в ночном секторе магнитосферы. В течение одного типичного 11-летнего солнечного цикла в среднем около 200 дней могут наблюдаться сильные магнитные бури. Если магнитная буря является относительно редким событием (примерно несколько десятков сильных и умеренных бурь происходят в течение года в зависимости от фазы солнечного цикла), то суббури разной интенсивности возникают в среднем один раз в три дня. Суббуря является своеобразным «космотрясением», развитие которого внешне напоминает землетрясение. Как и в сейсмологии, энергия, поступающая от солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) и накапливающаяся в хвосте магнитосферы, спонтанно высвобождается при взрывном начале суббури. Если суббуря может развиваться изолированно, на фоне магнитной бури обязательно возникнут суббуревые активизации. Физической разницы и качественного различия между изолированной суббурей и суббурей во время бури нет, за исключением повышенных амплитуд последней.

В качестве примера суббури во время бури приведем результаты наблюдений во время магнитной бури 17 марта 2013 г. [Белаховский и др., 2018]. Она началась в ~06 UT, когда скорость солнечного ветра резко увеличилась с ~400 до ~650–700 км/с, а ММП стало антипараллельным геомагнитному полю, что обеспечило пересоединение полей и длительное поступление энергии в магнитосферу. Амплитуда индекса $|Dst|$, характеризующего интенсивность магнитной бури, в максимуме бури (~21 UT) достигала ~120 нТл. Авроральный AE -индекс, характеризующий интенсивность аврорального электроджета, резко возрос до ~1000 нТл. Всего 17 марта AE -индекс показал появление трех авроральных активизаций.

Было зарегистрировано несколько заметных всплесков интенсивности ГИТ (рис. 2) в ЛЭП «Северный транзит». Пиковая величина размаха вариаций ГИТ на терминальной станции VKN достигала ~70 А. Началу роста AE во время каждой из активизаций соответствуют всплески $|d\mathbf{B}/dt|$ и интенсивности ГИТ (в ~06, ~08, ~16 UT). Однако однозначной связи между интенсивностью суббури и величиной ГИТ нет. Сравнение амплитуд магнитных возмущений по СЮ-компоненте ΔX и ВЗ-компоненте ΔY с амплитудами производных $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ и полной производной $|d\mathbf{B}/dt|$ показывает, что хотя $\Delta X \gg \Delta Y$, $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$ оказываются сопоставимыми, т. е. малые ΔY не означают малости dY/dt и дают соизмеримый вклад в повышение variability магнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$. Таким образом, во время суббури геомагнитное поле меняется не только по величине, но и по направлению и его вариации нельзя считать обусловленными только вариациями интенсивности

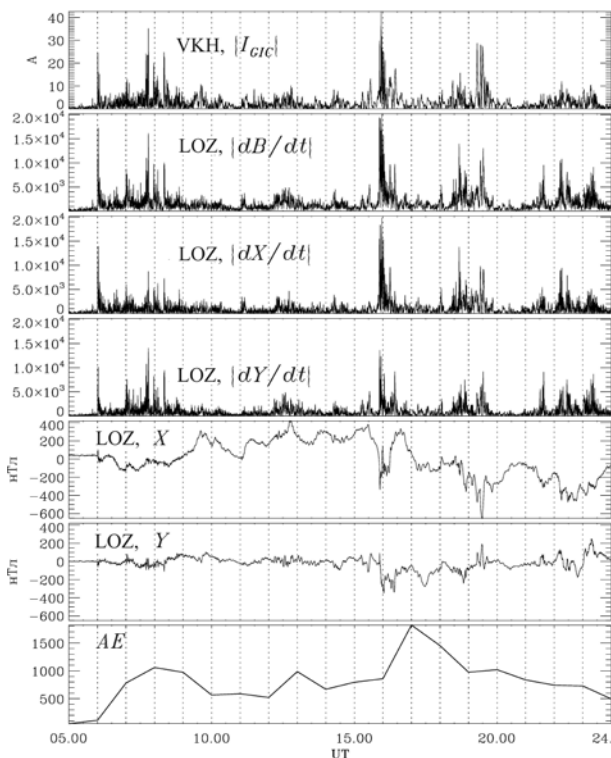


Рис. 2. Вариации амплитуды ГИТ на подстанции VKN во время магнитной бури 17 марта 2013 г., variability геомагнитного поля на ст. LOZ, магнитного поля на ст. LOZ (X -, Y -компоненты), и AE -индекса

аврорального западного электроджета. Дальнейшие исследования [Kozyreva et al., 2018] показали, что области максимального магнитного возмущения $\Delta \mathbf{B}$ и наибольшей variability поля $|d\mathbf{B}/dt|$ разнесены в пространстве.

В отличие от типичных авроральных суббурь, центр развития полярных суббурь приходится на очень высокие геомагнитные широты 74° – 75° . Несмотря на большую величину таких суббурь (магнитные бухты до ~1000 нТл), наблюдаемые при этом ГИТ не очень высоки (<10 А). Причина заключается в том, что эпицентр усиления $d\mathbf{B}/dt$ при полярных суббурях находится выше, чем широты энергетических систем.

Условная пороговая граница возможного электромагнитного воздействия на энергосистемы (большие величины $d\mathbf{B}/dt$) находится около 50° – 55° геомагнитной широты, при этом положение границы связано с движением аврорального овала [Ngwira et al., 2018].

2.3. Локальные импульсные возмущения геомагнитного поля

При рассмотрении воздействий КП на ЛЭП обычно предполагается, что экстремальные геомагнитные и геоэлектрические поля пространственно однородны по всей области энергосистемы. Однако часто на фоне общего усиления геомагнитного поля во время суббурь наблюдаются локализованные в пространстве импульсные геомагнитные возмущения [Engebretson et al., 2019]. Структура локального геоэлектрического поля во время этих экстремальных возмущений может сильно отличаться от глобально и регионально усредненных геоэлектрических полей [Pulkkinen et al., 2015; Ngwira et al., 2015]. Пример глобальных геоэлектрических полей, показывающих локализованные всплески на геомагнитных станциях в Европе и США во время события 13 марта 1989 г., показан на рис. 3. Возмущение теллурического поля ~5.9 В/км оказывается резко локализованным. Физические процессы, определяющие генерацию этих экстремальных значений, недостаточно изучены. Появление локальных усилений геоэлектрического поля показывает, что интенсивные ГИТ могут возникать не только на высоких, но и средних широтах, так как авроральный электроджет смещается в средние широты при сильно возмущенных геомагнитных условиях. Неоднородности в структуре проводимости земной коры (например, переход от моря к суше) могут также привести к локальным усилениям геоэлектрического поля.

Дальнейшие исследования [Pulkkinen et al., 2015] показали, что при сильных возмущениях на фоне регулярного возрастания геоэлектрического поля выделяются локальные неоднородности, связанные с характерными особенностями распределения проводимости, при этом возможны значительные изолированные всплески электрического поля. Так, в событии 29 октября 2003 г. максимальное значение электрического поля в относительно «однородной» ситуации составило 3.1 В/км, а на ст. Narsarsuaq в Гренландии развился локальный экстремум ~11.4 В/км.

Geoelectric field distribution on 1989-03-13 21:46 UT. Max. IEI: 5.91 V/km.

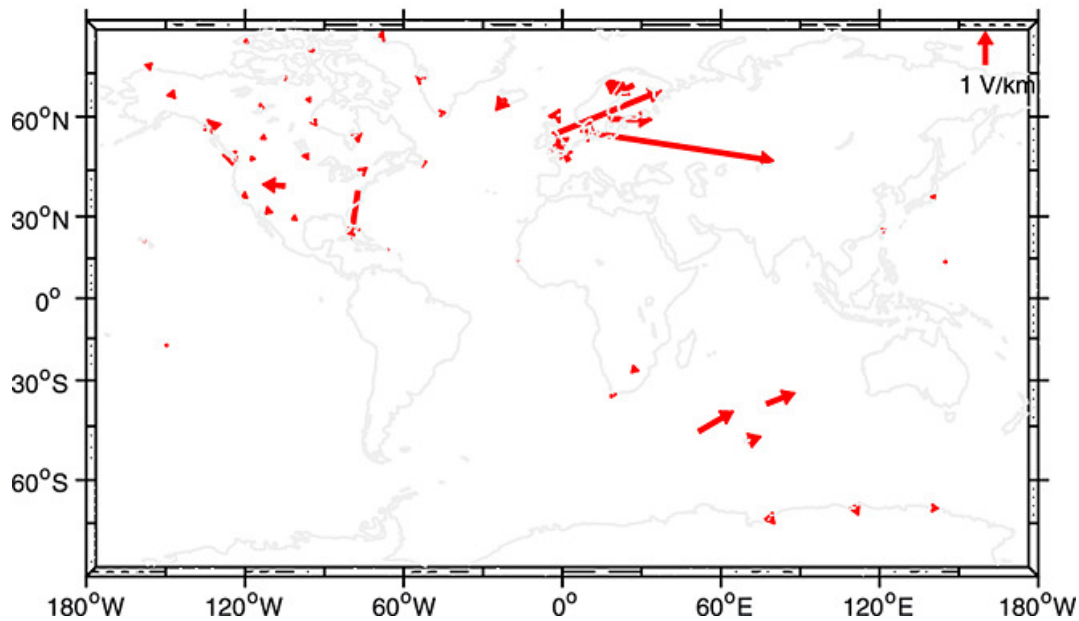


Рис. 3. Планетарное распределение вектора возмущенного геоэлектрического поля во время бури 13 марта 1989 г. из работы [Ngwira et al., 2015]

Физические причины таких локальных возрастных электрического поля требуют дополнительных исследований.

2.4. Тонкая структура суббури: серии магнитных импульсов типа Ps6/Pi3

После взрывной фазы суббури часто наблюдаются интенсивные нерегулярные пульсации Pi3/Ps6 — квазипериодическая последовательность импульсов длительностью 5–20 мин. Эти пульсации представляют собой не гармонические колебания, а серии магнитных возмущений с крутыми фронтами. Пульсации Ps6 наиболее заметны в Y-компоненте, и варибельность поля также наиболее велика в Y-компоненте, т. е. $|dY/dt| \gg |dX/dt|$ и $|dY/dt| \gg |dZ/dt|$. Благодаря крутым фронтам этих импульсов производная по времени магнитного поля достигает ~ 20 нТл/с. Иррегулярные квазипериодические магнитные возмущения Ps6 часто сопровождаются авроральными явлениями — omega bands сияниями.

Пульсации Ps6 вызывают квазипериодические всплески ГИТ. Хотя амплитуды квазипериодических возмущений Pi3/Ps6 меньше, чем магнитная бухта при суббури, однако быстро меняющиеся поля таких возмущений могут вызывать значительные всплески ГИТ [Viljanen, 1998; Apatenkov et al., 2004; Белаховский и др. 2018; Ягова, др., 2018]. В суббури с такими пульсациями ГИТ достигает максимума не в начале суббури, а во время одного из последующих Ps6-импульсов. Belakhovsky et al. [2019] и Apatenkov et al. [2020] описали события, в которых геомагнитные Ps6-пульсации возбуждали ГИТ в ЛЭП интенсивностью до 120 А.

Токовые системы в ионосфере, ответственные за импульсные геомагнитные возмущения и всплески ГИТ, могут представлять собой локализованные

вихревые структуры [Dimmock et al., 2019]. Специальная техника анализа данных 2D-сети магнитометров была разработана для выделения локализованных мелкомасштабных вихревых структур [Чинкин и др., 2020]. Анализ события 29 июня 2013 г. [Chinkin et al., 2021] показал, что фактически источником всплесков ГИТ в ЛЭП на северо-западе РФ является не глобальная интенсификация ионосферного электроджета, а появление короткоживущих мелкомасштабных структур в ионосферных токах. Результаты этой методики, приведенные на рис. 4, показывают, что экстремальные всплески ГИТ (с размахом >200 А) в ранние утренние часы однозначно связаны с импульсами, образующими Ps6-пульсации, — последовательностью локализованных (радиус ~ 200 – 250 км) вихревых токов, поддерживаемых струями продольных магнитосферных токов, имеющими попеременно меняющееся направление с плотностью до ~ 5 А/км² и распространяющимся по азимуту в восточном направлении (к Солнцу).

Мелкомасштабные вихревые возмущения такого типа по аналогии с метеорологическими явлениями можно качественно представлять себе как космические торнадо [Pilipenko et al., 2018]. Именно такие торнадо вызывали наиболее интенсивные ГИТ в системе «Северный транзит» за восемь лет наблюдений.

2.5. Ps5-пульсации

В ранние утренние часы на авроральных и субавроральных широтах наблюдаются квазимономатические пульсации Ps5 с периодами ~ 3 – 5 мин и длительностью до нескольких часов. Пример этих пульсаций 8 октября 2015 г., зарегистрированных на станциях в Скандинавии, приведен на рис. 5 из работы [Kozyreva et al., 2020]. Амплитуды X- и Y-пуль-

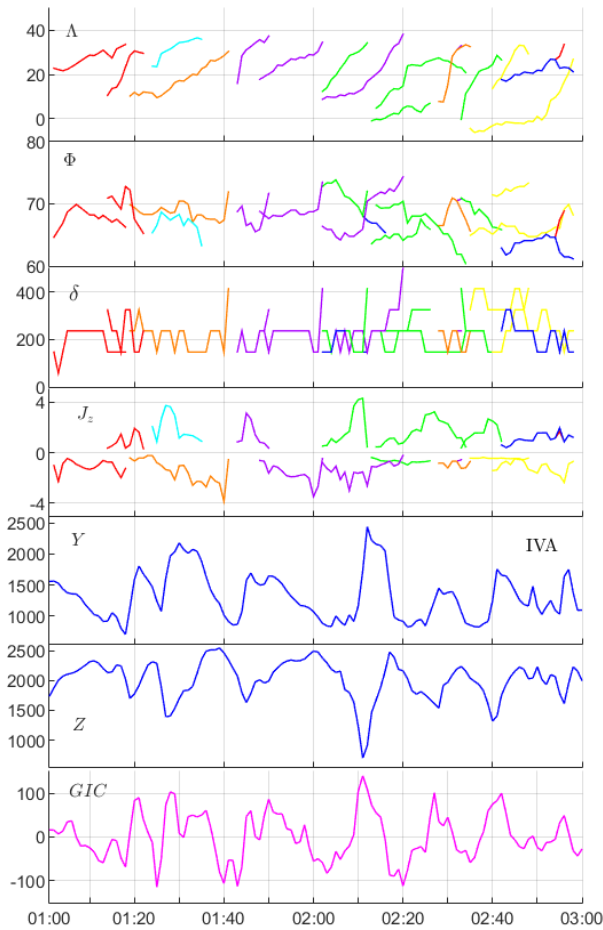


Рис. 4. Результат анализа данных 2D-сети магнитометров IMAGE с целью выделения локализованных вихревых структур в ионосферных токах 29 июня 2013 г. Сверху вниз: долгота центров вихрей; широта их центров; масштаб вихрей; плотность продольного тока в центре вихрей; магнитное возмущение на ст. IVA (Y- и Z-компоненты); ГИТ на ст. VKH

саций сравнимы (размах колебаний до ~200 нТл), тогда как пик в Z-компоненте больше (до ~600 нТл), но более локализован по широте. Те же самые соотношения справедливы для изменчивости поля $|dZ/dt| \sim 15$ нТл/с, что примерно в два раза больше, чем $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$. Благодаря высокой магнитной изменчивости геомагнитного поля пульсаций Pc5 амплитуда вызываемых ими ГИТ достигает ~12 А.

Сбои в работе электрооборудования могут быть вызваны преждевременным старением отдельных частей высоковольтных трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренных по величине ГИТ. При этом из-за гистерезисных явлений в трансформаторах даже ГИТ порядка нескольких ампер могут создать потенциальную угрозу для корректной работы релейной защиты. Поэтому длительное существование (несколько часов) ГИТ умеренной интенсивности, вызванных геомагнитными Pc5-пульсациями, может быть даже более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные и интенсивные всплески ГИТ во время начал суббури и бури. Длительная волновая активность диапазона Pc5 может привести также к таким кумулятивным эффектам, как коррозия трубопроводов [Lehtinen, Pirjola, 1985].

Особенно эффективными источниками ГИТ могут быть глобальные пульсации Pc5. Этот подтип Pc5-пульсаций имеет амплитуду почти на порядок выше, чем типичные Pc5-пульсации, наблюдается в более широком интервале широт и возбуждается на фазе восстановления магнитных бурь при высоких скоростях солнечного ветра [Marin et al., 2014]. Фактический драйвер ГИТ — теллурическое электрическое поле E — может быть оценено для заданного магнитного поля $B(f)$, изменяющегося с частотой f над однородной землей с проводимостью σ , из граничного импедансного условия (в приближении плоской волны) $E/B = \sqrt{\omega/\mu\sigma}$. Для пульсаций Pc5 с частотой $\omega=0.01$ с⁻¹ при средней проводимости земной поверхности $\sigma=10^{-4}$ См/м это соотношение дает E [мВ/км] / B [нТл] ≈ 12.6 (мВ/км)/нТл. Для глобальных пульсаций Pc5 с амплитудой $B=100$ нТл ожидаемое теллурическое поле может достигать $E \sim 1.2$ В/км. Это почти столько же, сколько дает оценка, сделанная [Lucas et al., 2018] для величины экстремального теллурического поля, которое могло бы наблюдаться один раз в столетие на территории США.

2.6. Статистические особенности вариативности геомагнитного поля dB/dt

Статистически пространственно-временные вариации геомагнитного поля по данным сети станций можно характеризовать структурной функцией

$$S^2(\Delta r, \tau) = \langle |B(t, \mathbf{r}) - B(t + \tau, \mathbf{r} + \Delta \mathbf{r})|^2 \rangle,$$

где $\langle \rangle$ означает усреднение по времени. Для белого шума структурная функция во времени следует закону $S_2(t) \sim const$, а для диффузного броуновского движения $S_2(t) \sim t$. В общем случае скейлинг самоподобного процесса с показателем H подчиняется закону $S_2(t) \sim t^{2H}$. Этот метод был применен к данным сети IMAGE, чтобы определить структурные особенности геомагнитных вариаций в диапазоне масштабов от 100 до 1000 км [Pulkkinen et al., 2006]. Для флуктуаций возмущения магнитного поля для обеих горизонтальных компонент структурная функция имела степенной характер — наблюдался ее линейный рост в log-log масштабе. Степенные зависимости статистических характеристик оказываются характерной особенностью геофизических процессов, которые, по-видимому, являются динамическими системами. Однако для вариативности поля dB/dt значительное изменение динамики флуктуаций было найдено на масштабах ~80–100 с. Здесь временная производная магнитного поля претерпевает переход от коррелированного (линейно-растущая структурная функция) к некоррелированному (выход на $const$) временному поведению. При этом $S(\Delta r, 0)$ демонстрирует медленный степенной рост с увеличением пространственных масштабов. Такое пространственно-временное поведение dB/dt на временных масштабах более 100 с напоминает некоррелированный белый шум. Этот результат накладывает ограничения на возможный горизонт прогноза временной производной магнитного поля.

Основная трудность в прогнозировании ГИТ заключается в большой изменчивости масштабов ионосферного тока, вызывающего ГИТ. Суточный

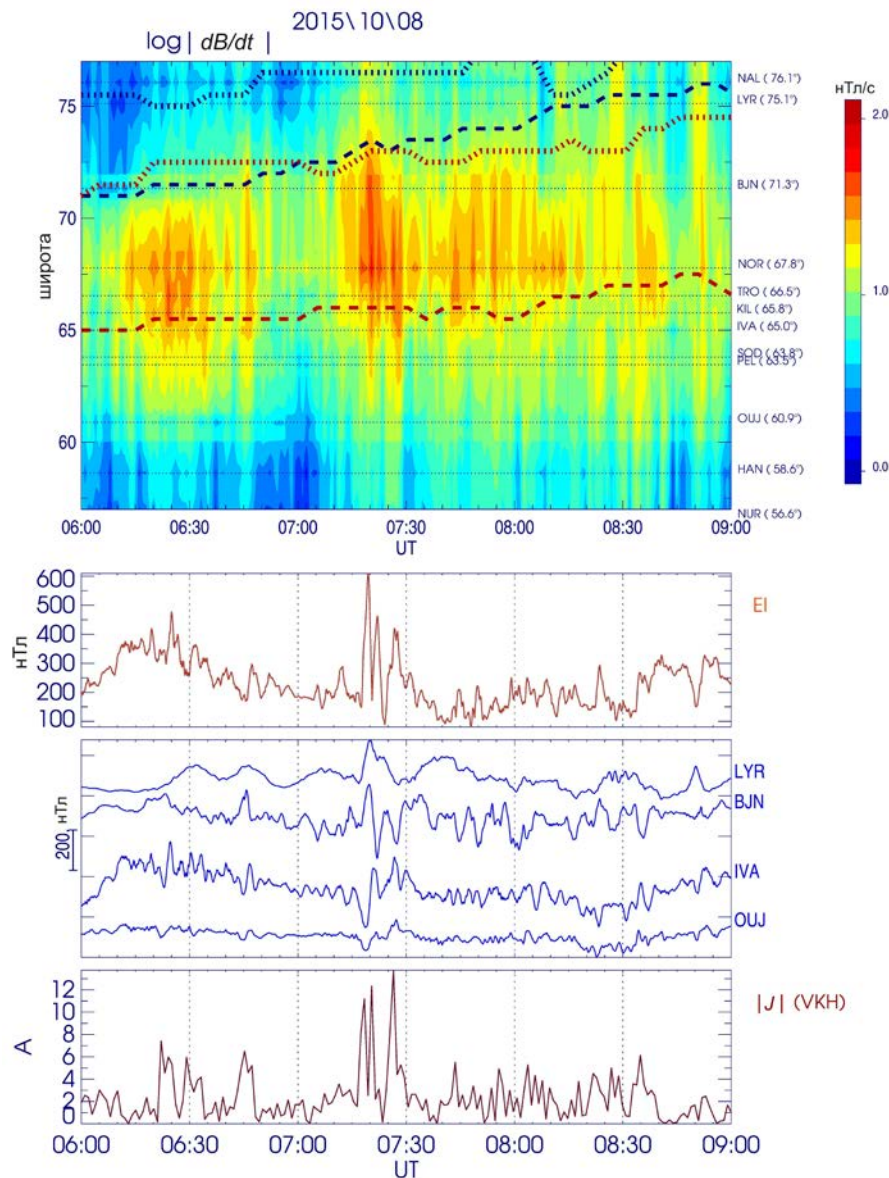


Рис. 5. Магнитная кеограмма (распределение мощности варибельности геомагнитного поля dB/dt по широте) пульсаций Pc5, зарегистрированных 8 октября 2015 г. Верхняя из трех панелей в нижней части рисунка показывает вариации локального индекса аврорального электроджета EI. Ниже — вариации геомагнитного поля (X -компонента) на станциях сети IMAGE и амплитуда ГИТ $|J|$ на ст. VKH

ход появления больших значений ГИТ имеет четкий максимум около магнитной полуночи, что соответствует времени возникновения суббури. Повышенная геомагнитная активность, очевидно, является необходимым условием возникновения большого ГИТ. Тем не менее, большая величина магнитного возмущения ΔB необязательно означает, что dB/dt также велико, и наоборот. Как показал Viljanen et al. [1998], большие наблюдаемые значения dB/dt почти всегда связаны с западным электроджетом. Разброс направлений горизонтального вектора производной по времени (dB/dt) оказывается гораздо больше, чем разброс вектора горизонтального магнитного возмущения (ΔB), что свидетельствует о наличии быстроменяющихся ионосферных токовых структур с масштабами 100 км или менее, наложенных на фоновые вариации западного электроджета [Viljanen et al., 2006a; Viljanen, Tanskanen, 2011].

Ключевой величиной, определяющей величину ГИТ, является производная горизонтального магнитного поля dB/dt [Oliveira, Ngwira, 2017]. Важный вопрос — насколько тесно $|dB/dt|$ связана с $|\Delta B|$? Знание таких соотношений поможет улучшить возможности прогнозирования событий ГИТ, так как в прогнозировании амплитуд магнитных возмущений $|\Delta B|$ или рассчитываемых по ним индексов (например, AE) достигнут значительный прогресс. Наибольшее значение dB/dt отмечается вскоре после начала взрывной фазы суббури, хотя многие события и позже имеют более высокие значения производной. Статистически появление максимума dB/dt приходится на пятую минуту после начала суббури на геомагнитных широтах $<72^\circ$ [Viljanen et al., 2006a]. Однако это распределение имеет длинный хвост до десятков минут. Наличие таких продолжительных хвостов в распределении характерно для сложных

мультимасштабных систем. Время появления максимума dB/dt после начала суббури увеличивается в зависимости от широты от ~ 15 мин на $\Phi \sim 56^\circ$ до ~ 45 мин на $\Phi \sim 75^\circ$. При этом суббури во время бури могут иметь вдвое большую максимальную амплитуду $|dB/dt|$ на всех широтах по сравнению с изолированными суббурями.

Статистические закономерности несколько различаются для изолированных суббурь и суббурь во время бурь. Широтный максимум $|dB/dt|$ во время бури находится на $\sim 5^\circ$ южнее, чем для изолированной суббури, что отражает хорошо известный сдвиг аврорального овала к экватору при повышении магнитной активности. Медианное значение времени появления $\max(|dB/dt|)$ увеличивается как функция широты для суббурь обоих типов. Анализ соотношений между максимальным значением $\max(|\Delta B|)$ и одновременным $\max(|dB/dt|)$ для разных типов суббурь показывает высокую корреляцию между $|\Delta B|$ и $|dB/dt|$ — ~ 0.75 для изолированных суббурь и ~ 0.66 для суббурь во время бури. Наклон кривой регрессии почти одинаков для суббурь обоих типов, что указывает на то, что механизм, создающий возмущения ΔB и dB/dt во время суббурь, не зависит от наличия магнитной бури.

Явное большинство значений $\max(|dB/dt|)$ связано с западным электроджетом. Разброс значений dB/dt означает, что быстрые изменения не всегда связаны с усилением электроджета, но часто — с ионосферными структурами меньшего масштаба. Восточный электроджет доминирует во второй половине дня около 13–21 LT, западный — около 01:30 LT. Суточный ход средней величины dB/dt показывает увеличение в ночные часы, что согласуется с ходом интенсивности электроджета. Однако отчетливый утренний максимум значений dB/dt около 05 LT не имеет аналога в суточном ходе интенсивности электроджета. Вероятность появления больших значений dB/dt в области восточного электроджета невелика.

3. СБОИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ВЫЗВАННЫЕ ГИТ

3.1. Нарушения в работе промышленных трансформаторов на авроральных широтах

ГИТ, возбуждаемые при резких изменениях геомагнитного поля, опасны, в первую очередь, для трансформаторных подстанций высоковольтных ЛЭП [Трищенко, 2008]. Поскольку ГИТ имеют очень низкую частоту по сравнению с промышленной частотой 50–60 Гц, протекание квазипостоянного тока через обмотки трансформаторов приводит к насыщению магнитопроводов трансформаторов. Постоянная составляющая в токе силового трансформатора появляется также в момент его включения, поэтому реле защиты силовых трансформаторов обычно настраиваются таким образом, чтобы не реагировать на постоянную составляющую в токе. В результате обычная релейная защита не будет реагировать на ГИТ, насыщающие трансформатор, и он просто сгорит. В истории известны случаи повреждения силовых трансформаторов под дей-

ствием ГИТ во время сильных магнитных бурь [Gaunt, Coetzee, 2007], при которых по всему миру происходили срабатывания систем релейной защиты и наступали блэкауты в ЛЭП [Boteler et al., 1989; Karpenman, 2003, 2005; Pulkkinen et al., 2003, 2005]. Восстановление энергосистем после сбоев электроснабжения может занять от нескольких часов до нескольких месяцев (в связи с отсутствием во многих энергосистемах резервных силовых трансформаторов). Это грозит настоящим коллапсом для современного человечества, слишком зависимого от современных технологий и уязвимо по отношению к катастрофам такого рода.

Наиболее интенсивные ГИТ (до сотен ампер) и электрические поля в поверхностных слоях Земли (>10 В/м) возбуждаются на авроральных широтах при магнитных бурях и суббурях [Boteler, 2001]. Однако точная оценка ГИТ в ЛЭП при магнитной буре требует знания проводимости поверхностных слоев земной коры и геометрии ЛЭП. Во время развития бури или суббури на фоне относительно гладких закономерностей наблюдаются экстремальные выбросы амплитуды возмущения. С точки зрения обеспечения стабильной работы энергораспределительной системы эти экстремальные события могут оказаться наиболее опасными. Например, вариации магнитного поля во времени с $dB/dt = 1$ нТл/с индуцировали в финских высоковольтных сетях ток величиной порядка нескольких ампер, а вариации с $dB/dt > 40$ нТл/с привели к нарушениям в работе скандинавских энергетических сетей [Viñjanen, Piñjola, 1994]. Во время магнитосферных возмущений обнаружены неоднократные случаи возбуждения гармоник промышленной частоты в нейтральных высоковольтных автотрансформаторов, что свидетельствует о перегрузке трансформаторов, смещении их рабочей точки и возникновении угрозы стабильной работы энергосистемы [Сивоконь и др., 2011]. Приведем некоторые примеры катастрофических последствий сильных магнитных бурь, имевшие место в разных странах.

Магнитная буря 13 марта 1989 г. вызвала разрушение силового трансформатора и полный блэкаут в канадской энергетической системе Hydro-Quebec [Thomson et al., 2010]. Стоимость нанесенного ущерба только этой энергетической системе составила около \$13 миллионов [Bolduc et al., 1998, 2000; Bolduc, 2002]. Из-за этой аварии более шести миллионов человек оставались без электричества в течение восьми часов. Если бы подобная буря затронула северо-восток США, экономический ущерб мог бы превысить \$10 миллиардов [National Research Council, 2008], не считая серьезных социальных потрясений. Эта буря вызвала перегрев силового повышающего трансформатора и выход его из строя на атомной электростанции Salem Nuclear Power Plant (США). По оценке [Karpenman, 2010] ГИТ, который привел к выводу трансформатора из строя, составлял ~ 95 А. Поскольку размеры области, охваченной геомагнитной бурей, велики, вызванные искажения происходят во многих трансформаторах почти одновременно. В результате может возникнуть сильный быстро нарастающий ку-

мулятивный эффект. Во время события Hydro Quebec (Квебек, Канада) от начального нарушения до полного блэкаута прошло всего 1.5 мин. К счастью, это событие не распространилось за границы провинции Quebec. Однако, если бы буря развилась во время пиковой нагрузки, каскад сбоев распространился бы вплоть до области Washington D.C. [Guillon et al., 2016]. В день блэкаута в Квебеке, в Швеции отключились пять линий (130 кВ) электропередач, а примерно в 21.20 UT из-за ГИТ перегрелся ротор одного из генераторов на атомной станции [Wik et al., 2008].

Двадцать девятого апреля 1994 г. вскоре после начала сильной геомагнитной бури на АЭС Maine Yankee полностью был выведен из строя мощный повышающий трансформатор.

Большая магнитная буря 30 октября 2003 г. вызвала нарушения в работе энергетических систем Швеции, полное отключение продолжалось от 20 до 50 мин [Pulkkinen et al., 2005]. Во время резкого начала суббури электросеть пострадала так, что в Мальмё — крупнейшем городе на юге Швеции — в течение часа были перерывы в подаче электроэнергии. Вариабельность геомагнитного поля достигала ~10 нТл/с в большей части Швеции. На магнитной станции Abisko значение dB/dt достигло 23 нТл/с. Эти возмущения вызвали срабатывание защитных цепей высоковольтной ЛЭП, что привело к сбоям в ее работе в северной Швеции. В южной части Швеции в это время изменчивость dB/dt была довольно низкой. Как нарушения в высоковольтных ЛЭП в северной Швеции вызвали отключение электроэнергии в Мальмё на юге Швеции (на геомагнитных широтах 55° – 60°), остается невыясненным.

Во время магнитной бури в ноябре 2003 г. произошли отказы и повреждение 15 трансформаторов в результате внутреннего нагрева в высоковольтной южноафриканской магистральной системе электропередач, которые были связаны с возбуждением ГИТ в результате геомагнитных возмущений [Gaunt, Coetzee, 2007; Karpenman, 2005].

3.2. ГИТ на средних и низких широтах

Казалось бы, энергетические сети на средних широтах не должны быть подвержены угрозе ГИТ — но это не так. Были зарегистрированы резкие всплески реактивной нагрузки и сбои в работе трансформаторов сети Великобритании [Erinmez et al., 2002], Франции [Kelly et al., 2017], и Испании [Torta et al., 2014] в результате воздействия ГИТ. Энергетическая система Шотландии столкнулась с проблемами во время магнитной бури в октябре 2003 г., когда ГИТ возросли до 40 А. Во время этой бури теллурические электрические поля оказались в 50 раз больше, чем в геомагнитно-спокойных условиях [Thomson et al., 2005; McKay, Whaler, 2006]. Воздействие геомагнитных возмущений на работу энергетических линий серьезно изучается и моделируется в Новой Зеландии [Divett et al., 2017, 2018; Rodger et al., 2017]. Регистрация ГИТ в Японии показала наличие связи между величиной геомагнитных возмущений во время магнитных бурь и интенсивностью ГИТ [Watari et al., 2009]. Начаты исследования возможного риска ГИТ в протяженных ЛЭП в Юж-

ной Африке [Ngwira et al., 2008]. В Бразилии во время бури 7–10 ноября 2004 г. на подстанциях ЛЭП значения ГИТ достигали 15 А [Trivedi et al., 2007]. Обстоятельства произошедших событий указывают на то, что причиной выхода оборудования из строя во всех этих случаях было воздействие геомагнитных процессов.

3.3. Сбои в работе железнодорожного оборудования

Исторически первым описанным событием, связанным с нарушением железнодорожной сигнализации, явилась буря на Нью-Йоркской железной дороге 13 мая 1921 г. на четвертом году после максимума 15-го солнечного цикла [Love et al., 2019]. Прелюдией к этой магнитной буре явилась двойная вспышка на лимбе Солнца, видимая даже невооруженным глазом [Hargood, 2019]. Во время бури полярные сияния наблюдались на восточном побережье США и даже в Калифорнии. Утром 15 мая вышла из строя система сигнализации на центральной станции Нью-Йорка, затем загорелась башня диспетчерской, после чего пожар уничтожил всю железнодорожную станцию. Во время той же бури, в Швеции загорелась телефонная станция и буря повредила телефонную, телеграфную и кабельную связь на большей территории Европы.

В качестве примера современных происшествий приведем бурю 13–14 июля 1982 г. с $Dst = -325$ нТл, когда сбои в работе железнодорожной автоматики были отмечены на юге Швеции [Wik et al., 2009]. На железной дороге возникли проблемы со световой сигнализацией: сигнальный светофор переключался между красным и зеленым светом без видимых причин. Поскольку напряжение батареи в системе управления реле сигнализации составляет 3–5 В, весьма вероятно, что дополнительное напряжение, вызванное геоэлектрическим полем, могло вызвать ошибочную работу релейной системы. Это предположение согласуется с оценками индукционного электрического поля порядка 4–5 В/км, полученными при моделировании с двухслойной моделью проводимости Земли.

В РФ выполнен ряд работ по исследованию связи аномалий в работе железнодорожной сигнализации с геомагнитными возмущениями. Исследовалась статистическая связь между уровнем геомагнитной активности и длительностью сбоев в работе систем автоматики Сибирской железной дороги в 2004 г. [Касинский и др., 2007; Ptitsyna et al., 2007, 2008]. Анализ аномалий, указанных в рапортах и журналах железнодорожных служб, показал, что примерно 45 % аномалий заведомо не были вызваны геомагнитными факторами. Эти случаи были отброшены, а для оставшихся аномалий получено, что суммарная суточная длительность аномалий T на всех участках дороги меняется в согласии с развитием геомагнитной бури. При достижении пика геомагнитной активности T увеличивается в ~3 раза. Наблюдается корреляция между T и локальным индексом геомагнитной активности. В частности, для двух супербурь 17 июля — 2 августа и 5–12 ноября 2004 г. коэффициент корреляции был достаточно высоким (0.83 и 0.71 соответственно).

Были документированы сбои в работе систем автоматики Северной железной дороги [Belov et al., 2005]. При анализе сбоев в работе систем сигнализации во время 16 сильных геомагнитных бурь за период 1989–2005 гг. было обнаружено, что практически каждая буря является причиной аномалий в работе сигнальной автоматики [Eroshenko et al., 2010]. Полученное в работе распределение зарегистрированных аномалий в зависимости от местного времени (рис. 6) согласуется с известным распределением периодов развития ГИТ [Воробьев и др., 2019]. Сбои в работе систем автоматики, в частности ложные срабатывания светофоров, связывались с наводкой электрического поля на рельсы поперек пути, что могло вызывать имитацию прошедшего локомотива.

Анализ сбоев в работе сигнальной автоматики Северной и Октябрьской железных дорог во время сильных геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности (2009–2010 гг.) [Сахаров и др., 2009] показал, что аномалии развиваются почти синхронно в тесной связи с возбуждением значительных геоэлектрических полей. Анализ связи частоты проявления аномалий с уровнем геомагнитной активности, выполненный для Октябрьской железной дороги для 2002–2006 гг., показал, что при низкой и умеренной активности в авроральной и субавроральной зонах аномалии отмечались с частотой от 1 до 10 % от исследуемых временных интервалов, а при средней и высокой активности частота регистрации аномалий составляла порядка 30 и 80 % соответственно.

3.4. Трубопроводы

Космическая погода и вызванные ею глобальные электромагнитные возмущения представляют опасность и для трубопроводов, особенно для тех, которые расположены в зоне интенсивной геомагнитной активности. Исследования реакции трубопроводов на геомагнитные возмущения ведутся весьма интенсивно [Campbell, 1980]. Геомагнитные возмущения и связанные с ними вариации геоэлектрического поля создают колебания напряжения, которые на продолжительное время выводят напряжение трубопровода из безопасного диапазона защиты. Во время сильных бурь в ноябре 2004 г. на трубопроводе в Австралии в течение ~12 ч флуктуации потенциала труба—почва примерно в три раза превышали установленные пределы [Trichtchenko, Boteler, 2002].

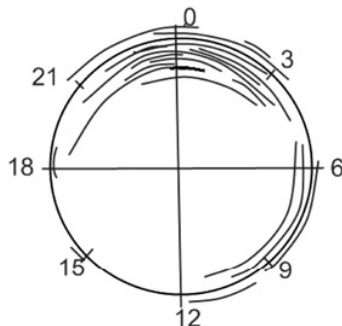


Рис. 6. Распределение аномалий в работе сигнализации на Северной железной дороге по местному времени при сильных геомагнитных бурях в 1989 г. и 2000–2005 гг. [Eroshenko et al., 2010]

В общем случае результатом развития ГИТ в трубопроводах является кумулятивный эффект усиления коррозии в точках заземления или повреждения изоляции, а также нарушение в работе катодной защиты или выход из строя электронных систем контроля. Например, на трубопроводе (ТQM) в Квебеке (Канада) коррозионное повреждение одной из секций трубопровода развилось через пять лет эксплуатации вместо ожидаемых 20–30 лет.

Локальные тектонические особенности места расположения трубопровода могут существенным образом влиять на скорость коррозии, связанной с ГИТ. В работе [Ingham, Rodger, 2018] представлены результаты анализа ГИТ в трубе и вариаций потенциала труба—почва на 200-км трубопроводе природного газа в Новой Зеландии. Анализ данных позволил заключить, что вариации потенциала и тока труба—почва тесно связаны с теллурическим полем, перпендикулярным трубопроводу. Наиболее вероятной причиной расхождений являются особенности структуры проводимости земли и положение береговой линии, что может влиять на распределение локального потенциала земли.

В работе [Campbell, 1978] при оценке токов, возбуждаемых в трубопроводе на Аляске, показано, что более 50 % времени токи не превышают 1 А и не могут оказать существенного влияния на скорость коррозии металла. Измерения тока в трубопроводе проводились по наведенному магнитному полю несколькими магнитометрами [Campbell, Zimmerman, 1980]. В то же время обнаружено, что во время сильных магнитных возмущений в трубопроводе возникают волны тока силой до 200 А.

В работе [Huttunen et al., 2008] суммировано проявление эффектов КП на трубопроводе в южной Финляндии (широта 56°–58° N) в 23-м солнечном цикле. Установлено, что количество случаев развития значительных (>10 А) токов в трубопроводе хорошо коррелирует с числом солнечных пятен, что подтверждает прямую связь ГИТ с солнечной активностью. В работе [Pirjola, Lehtinen, 1985] проведен расчет токов в трубе и в заземлении трубопровода на юге Финляндии для теллурического поля 1.0 В/км. Полученные величины (~50 и ~25 А, соответственно) представляются значимыми и при нарушении изоляции могут привести к заметному изменению времени коррозионного разрушения. Контроль потенциала трубы относительно земли на трубопроводе в Северной Альберте (Канада) позволил выявить сбои в работе катодной защиты, связанные с геомагнитными возмущениями. Организация распределенного заземления позволила существенно снизить количество выходов потенциала трубы за пределы безопасной работы системы защиты. На трубопроводе в Северной Норвегии было обнаружено, что потенциал труба—почва испытывает флуктуации с амплитудой ~5 В во время магнитных возмущений [Henriksen et al., 1978].

Хотя ГИТ являются главным образом источником проблем для технологических систем на высоких геомагнитных широтах, сильные геомагнитные возмущения могут вызывать также довольно значительные эффекты и в средних широтах [Hejda,

Bochnicek, 2005]. Анализ измеренного напряжения труба—почва в нефтепроводах в Чехии во время магнитной бури в 2003 г. показал, что простой метод определения электрического поля в приближении плоской волны и однородной модели проводимости земли хорошо соответствует измеренному напряжению труба—почва. Наибольшие амплитуды геомагнитного поля были достигнуты в начале геомагнитной бури, однако большие напряжения также индуцируются в главной фазе и на фазе восстановления за счет колебаний $Pc5$. Для трубопровода в северной Баварии [Brasse, Junge, 1984] проводили измерения тока в трубе и потенциала труба—почва. Трубопровод был снабжен катодной защитой от коррозии, кроме того, через каждые 30 км труба дополнительно подпитывалась потенциалом 2 В. Пиковые значения тока в трубе при среднем уровне геомагнитного возмущения достигали ~ 12 А, вариации потенциала составили ~ 3 В во время магнитной бури. Общее время недостаточной защиты от коррозии не превысило двух дней в течение года (~ 0.5 % общего времени).

В российской научной литературе не так много публикаций, отражающих результаты измерений ГИТ в трубопроводах или изменений потенциала труба—почва. Ток величиной до 3.2 А был зарегистрирован в газопроводе вблизи Якутска во время геомагнитного возмущения 21.01.2005 [Муллеров и др., 2006], оценка тока была выполнена методом дифференциальной магнитометрии. На участке магистрального газопровода Бованенково—Ухта проводились измерения защитных потенциалов в непрерывном режиме. Во время геомагнитного возмущения 12–13 сентября 2014 г. измеряемые потенциалы испытывали изменения амплитудой до 10 В [Ивонин, 2015]. Обнаруженный эффект возникновения неклассического источника блуждающего тока вынуждает поставить вопрос о возможном влиянии на системы электрохимической защиты на газопроводах [Панюшкин, 2014]. В то же время некоторые специалисты полагают, что хотя абсолютные величины геомагнитных блуждающих токов могут достигать сотен ампер, такие токи распределяются вдоль трубопроводов на всем их значительном протяжении. В результате плотность токов утечки при их разряде на землю не превышает значений естественной плотности токов традиционной почвенной коррозии, а потому проблема влияния магнитных бурь на коррозионные разрушения магистральных трубопроводов не столь критична.

Кумулятивное влияние умеренной геомагнитной активности часто является пренебрегаемым аспектом КП по сравнению с интересом к сильным событиям, которые могут катастрофически разрушить критические инфраструктуры. Тем не менее, существует опасение, что низкоинтенсивный, но более частый геомагнитный эффект может накапливаться, разрушая инфраструктуры, и, таким образом, иметь значительные экономические последствия. В работе [Khanal et al., 2019] исследованы временные изменения ГИТ в трубопроводе на средних и высоких широтах в течение длительных периодов умеренной геомагнитной активности, которая обусловлена

быстрым солнечным ветром с многочисленными периодами ММП южной ориентации из-за альвеновской волновой активности в солнечном ветре с периодичностью от 0.5–2 ч до 12–14 ч. Эти периоды, известные как HILDCAA-события (High Intensity Long Duration Continuous Auroral-Electrojet Activity), отличаются от геомагнитных бурь, хотя иногда они следуют за бурями. Было обнаружено, что вариации ГИТ во время HILDCAA включают короткие всплески больших ГИТ на фоне более медленно меняющегося фона. Длительные усиления ГИТ могут привести к усиленной коррозии трубопроводов. Результаты показывают, что кумулятивные воздействия КП требуют большего внимания со стороны исследовательского сообщества. Постепенно развивающаяся коррозия в трубопроводе — яркий пример того, почему нужно лучше изучить, как длительное воздействие умеренной КП может оказать значительное экономическое воздействие, медленно разрушая уязвимые системы.

4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГИТ

Основная проблема изучения воздействия КП на технологические системы состоит в отсутствии общедоступной для научного анализа информации о нарушениях в работе космических, энергетических систем, газопроводов, железнодорожных линий. Промышленные компании во всем мире крайне неохотно предоставляют мировому научному сообществу сведения об имевших место сбоях и аномалиях в работе своих систем. Поэтому делаются попытки проводить не только прямые измерения ГИТ на трансформаторных подстанциях, но и развивать дистанционные методы оценки интенсивности ГИТ в ЛЭП и трубопроводах.

4.1. ЛЭП «Северный транзит»

Полярным геофизическим институтом (ПГИ) совместно с Центром энергетики севера (ЦЭС) на Кольском полуострове и в Карелии создана единственная в России система непрерывной регистрации воздействия магнитосферных возмущений на ЛЭП «Северный транзит» [Sakharov et al., 2007; Сахаров и др., 2019]. С 2010 г. по настоящее время на четырех подстанциях (Лоухи, Кондопога, Выходной, Ревда) измеряется квазипостоянный ток, протекающий в заземленной нейтрали автотрансформатора, вызванный ГИТ [Данилин и др., 2010]. Выбор точек измерения позволяет исследовать распределение ГИТ на магистральной линии 330 кВ, ориентированной с юга на север, и на линии 110 кВ (запад—восток) к подстанции Ревда (рис. 7). Положение станций показано на рис. 7. Данные этой сети станций передаются в европейскую сеть по регистрации ГИТ EURISGIC (European Risk for Geomagnetically Induced Currents [<http://eurisgic.org>]), созданную для оценки риска воздействия геомагнитных возмущений на европейские энергетические системы. Данные системы ПГИ-ЦЭС могут быть использованы для проверки моделей ГИТ и оценки вклада геомагнитных возмущений в резкие скачки нагрузки в энергосетях [Ефимов и др., 2013].

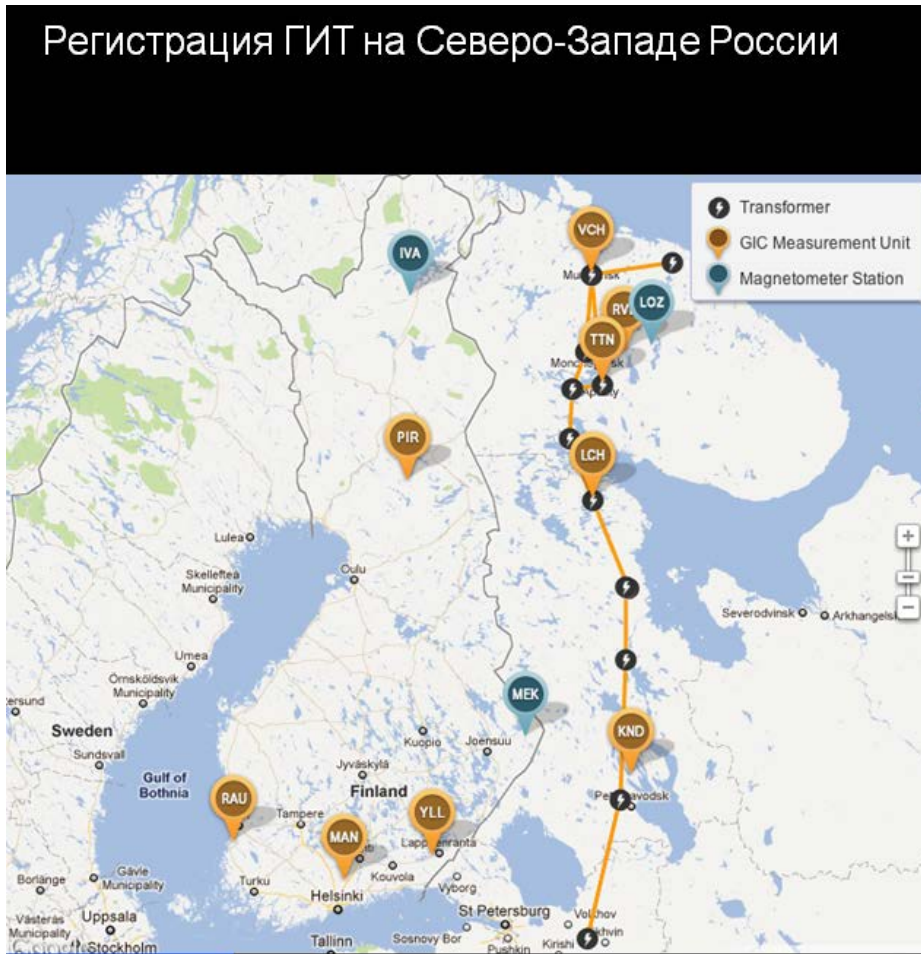


Рис. 7. Карта системы регистрации ГИТ на подстанциях ЛЭП «Северный транзит»

Для проведения измерений ГИТ в энергосистеме был выбран метод регистрации тока в нейтрали силового трансформатора [Вахнина, Кузнецов, 2013], для чего был разработан специальный датчик тока, включенный в распределенную систему регистрации, позволяющую проводить измерения в режиме почти реального времени [Баранник и др., 2012]. Величина ГИТ, протекающего в нейтрали конкретного трансформатора, помимо внешнего воздействия, зависит от схемы включения силового оборудования на подстанции. Всплески ГИТ, зафиксированные за время проведения наблюдений на магистрали «Северный транзит», не привели к нарушениям в работе высоковольтного распределительного оборудования, однако отмечались существенные искажения в работе силовых трансформаторов [Селиванов и др., 2017].

4.2. Метод дифференциальной магнитометрии

Для дистанционного измерения ГИТ в ЛЭП предложен метод дифференциальной магнитометрии (DMM). Этот метод является косвенным методом расчета ГИТ, протекающих в ЛЭП или протяженной проводящей системе. При использовании MDM низкочастотный ГИТ в проводах ЛЭП оценивается по разнице между магнитными записями, сделанными непосредственно под линией и на неко-

тором расстоянии с помощью двух идентичных магнитометров (схема установки показана на рис. 8).

При этом один магнитометр располагается под ЛЭП и измеряет как естественное магнитное поле Земли, так и магнитное поле, вызванное ГИТ в линии. Второй магнитометр, расположенный на расстоянии более 300 м от первого, измеряет только естественное геомагнитное поле. Разница между измеренными полями будет определяться вкладом ГИТ.

Поскольку прямое измерение ГИТ на трансформаторной подстанции, как правило, встречается с противодействием энергетических компаний, косвенный

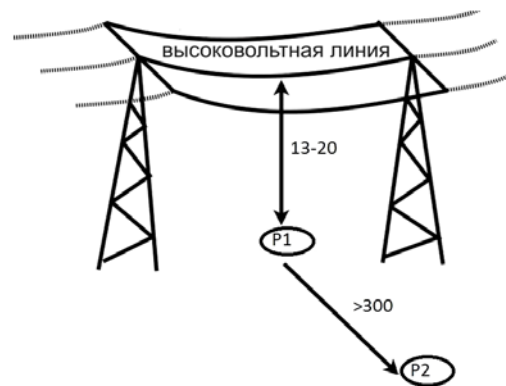


Рис. 8. Качественная схема MDM дистанционного измерения ГИТ в ЛЭП с помощью двух идентичных магнитометров в пунктах P1 и P2

метод дифференциальных магнитных измерений оказывается единственным возможным. ДММ с помощью разнесенных на 40 км магнитометров применяется с 1990-х гг. для измерения ГИТ в линии 400 кВ в сети Финляндии и газопроводах [Mäkinen, 1993; Viljanen, Pirjola, 1994]. Измерения ГИТ в нефтепроводе, идущем через Аляску, проводились с помощью двух магнитометров, расположенных на разных расстояниях от трубы [Campbell, 1980].

4.3. Гармоники электросети

Альтернативный способ мониторинга ГИТ в электроэнергетических системах основан на регистрации уровня гармоник, генерируемых силовыми трансформаторами электросети, при появлении в токе их обмоток постоянной составляющей (качественно механизм возникновения гармоник показан на рис. 15) [Кобелев, Зыбин, 2011; Селиванов и др., 2012]. Способ имеет преимущества, такие как отсутствие потребности применения дорогостоящего оборудования и возможность организации пункта наблюдений на базе обычного персонального компьютера в любой точке электросети. Предложенный подход был апробирован на базе электросети Камчатского края [Сивоконь и др., 2011, Сивоконь, Сероветников, 2013, 2015]. Были проведены долговременные наблюдения вариаций гармоник напряжения сети в различных пунктах наблюдения, характеризующиеся различной топологией питающих линий и условиями нагрузки на систему. Получены результаты, подтверждающие взаимосвязь вариаций уровня гармоник электросети с возмущениями магнитного поля Земли.

4.4. ГИТ в электрических сетях и ОНЧ-радиоизлучение

Радиоприемники очень низкой частоты (ОНЧ) могут являться средством дистанционного обнаружения ГИТ в электрических сетях. Когда трансформаторы нагружены ГИТ, они генерируют высокие гармоники переменного тока частотой 50–60 Гц, протекающего через эти сети. Часть мощности этих гармоник излучается в виде радиоволн на частотах до нескольких килогерц и даже регистрируются на спутниках. Существование этих ОНЧ-излучений в энергосистеме было впервые обнаружено более сорока лет назад. Однако в те годы интерес к КП и ГИТ был очень ограничен в отличие от сегодняшнего дня, когда эти темы вызывают глобальную озабоченность. В работе [Clilverd et al., 2018] было своевременное напоминание о том, что ОНЧ-излучения на гармониках частоты промышленной сети имеют значительный потенциал в качестве диагностического инструмента для мониторинга ГИТ в электрических сетях без вмешательства в сетевое оборудование. Это может давать серьезные практические преимущества с точки зрения безопасности и стоимости.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ГИТ

Современные энергетические системы — это глобальная сеть с крайне сложной топологией, которая

покрывает обширные территории земной поверхности, локальные геоэлектрические свойства которой (например, проводимость) могут различаться на несколько порядков величины. В средах с низкой проводимостью вероятность негативного воздействия сильных магнитных возмущений резко повышается, поскольку наведенные токи преимущественно текут через проводящие элементы промышленных сетей. Геоэлектрические поля, индуцированные в поверхностных слоях Земли во время магнитных бурь, могут мешать работе электрических сетей. Остается опасность, что появление в будущем экстремальной магнитной бури может привести к масштабной потере энергетических мощностей, что значительно повлияет на экономику стран, подверженных риску.

Попытки разработки устройств, блокирующих ГИТ на большой сети, пока не дали результатов. Поэтому основные надежды возлагаются на оперативный контроль и предупреждение относительно редких проблем, связанных с мощными магнитными бурями. Разность потенциалов в поверхностных слоях коры является причиной возникновения перегрузок в заземленных электроэнергетических системах. Однако прямую информацию о геоэлектрических полях получить нелегко. В то время как вариации геомагнитного поля отслеживаются с помощью мировой сети магнитометров (>300), регулярные наблюдения теллурических электрических полей пока крайне редки. Длительные же измерения геоэлектрического поля в обсерваториях гораздо более редки. Такие наблюдения геоэлектрического поля с 1983 г. поддерживает только Японское метеорологическое агентство в трех обсерваториях: Geo Forschungs Zentrum (Германия), Британская геологическая служба и Институт физики Земли (Франция).

5.1. Методы магнитотеллурического зондирования

Корректный расчет теллурических электрических полей и токов требует наличия достаточно плотной сети магнитометров и информации о геоэлектрическом разрезе земной коры. Оптимальной глобальной модели геоэлектрической проводимости не существует, поэтому при расчетах приходится пользоваться различными приближенными схемами [Boteler et al., 1998]. Сопоставление методик показало, что с хорошей точностью для расчета теллурических полей можно пользоваться импедансным соотношением в приближении плоской волны и плоской геометрии [Pirjola, 2002; Viljanen et al., 2015]. Это приближение справедливо в предположении, что горизонтальный масштаб возмущения много больше скин-длины [Wait, 1982]. Значительно упрощает ситуацию то, что для расчетов ГИТ важны интегральные оценки разности потенциалов между узлами протяженной системы (не менее нескольких сотен километров) и поэтому необходимые оценки с достаточной точностью можно провести и на сравнительно редкой сети магнитометров с грубой моделью проводимости [Beggan, 2015].

Основная причина ГИТ — геоэлектрическое поле, которое в приближении плоской волны связано с геомагнитными вариациями через поверхностный им-

педанс земной поверхности [Liu et al., 2009; Boteler, Rijola, 2019]. Импеданс определяется распределением электропроводности земной коры с глубиной. Вариабельность магнитного поля $d\mathbf{B}/dt$ более чувствительна к локальным аномалиям проводимости подстилающей поверхности, чем $\Delta\mathbf{B}$ [Thomson et al., 2009]. Электропроводность σ колеблется от 10^{-4} в недрах Земли до 3 См/м^2 в океане. Электрические сети наиболее чувствительны к помехам от естественных геоэлектрических полей с периодами от 10 до 1000 с. Изменения геомагнитного и геоэлектрического поля с такими периодами проникают в поверхностные слои Земли на глубину порядка скин-длины, составляющей от 2 до 3000 км.

Прямое измерение геоэлектрического поля \mathbf{E} концептуально просто: оно пропорционально разности потенциалов между парой электродов, заглубленных в землю. Для магнитотеллурических (МТ) исследований геоэлектрические измерения обычно проводятся в сочетании с магнитным вариометром. Качественно взаимодействие электромагнитного возмущения с земной корой можно представить как просачивание падающей волны с частотой ω на глубину порядка скин-длины δ . Если горизонтальный масштаб возмущения много больше, чем скин-длина (условие сильного скин-эффекта), на поверхности Земли выполняется импедансное соотношение $\mathbf{E}(\omega) = \mathbf{Z}(\omega)\mathbf{H}(\omega)$ между спектральными амплитудами векторов горизонтальных электрических $\mathbf{E} = \{E_x, E_y\}$ и магнитных $\mathbf{B} = \{X, Y\}$ составляющих (приближение плоской волны). Здесь $\mathbf{Z}(\omega)$ — поверхностный импеданс, определяемый распределением удельного сопротивления $\rho(z)$ внутри Земли. Для однородной земной коры импеданс $Z = \sqrt{\mu_0 \omega \rho}$ зависит от периода геомагнитного возмущения T как $Z(T) \propto T^{-1/2}$. Теллурическое поле E может быть синтезировано по измеряемым геомагнитным вариациям с использованием импедансного соотношения в частотной области между горизонтальными компонентами электрического $\mathbf{E}(\omega)$ и магнитного $\mathbf{B}(\omega)$ полей через комплексный тензор импеданса $\mathbf{Z}(\omega)$ следующим образом

$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \mu_0^{-1} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(\omega) \\ Y(\omega) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Информация об импедансе земной поверхности требует проведения предварительного МТ-зондирования, что было проделано только для отдельных участков земной поверхности. Расчеты теллурического поля значительно усложняются для 3D неоднородной среды или для высокоомных пород, где условие сильного скин-эффекта не выполняется [Kelbert et al., 2017].

Наиболее разработанной моделью планетарного распределения проводимости литосферы к настоящему времени является 3D-модель [Kuvshinov, Olsen, 2006]. На ее основе было рассчитано планетарное распределение теллурических полей от крупномасштабных магнитосферных источников [Kuvshinov, 2008]. Пиковые значения теллурических полей достигают $\sim 50 \text{ мВ/км}$ для бури с $Dst \sim 300 \text{ нТл}$ на средних широтах ($< 55^\circ$). Однако эта модель не может быть

применена в высоких широтах, где более интенсивные возмущения создаются более локализованными и динамичными суббуревыми процессами. Так $> 80 \%$ спектральной мощности вариаций геомагнитного поля на авроральных широтах сосредоточено на временных масштабах $< 8 \text{ мин}$ [Wintoff, 2005].

5.2. Вариации геомагнитного и теллурического полей как источник ГИТ

Обычно предполагалось, что интенсивность ГИТ J пропорциональна производной по времени геомагнитного поля, $\mathbf{J} \sim d\mathbf{B}/dt$. Однако это соотношение действительно для замкнутой цепи только в свободном пространстве. В реальных ситуациях контур, по которому протекают ГИТ, формируется ЛЭП, контактами заземления, оконечными трансформаторами и землей. Электрические параметры этих элементов, а также их зависимость от частоты известны очень приблизительно. Фактическая связь между спектральным составом магнитных вариаций $\Delta\mathbf{B}$, теллурическим электрическим полем E и током J должна быть изучена для каждой энергетической системы отдельно [Bonner, Schultz, 2017].

Пример такого исследования для системы «Северный транзит» дан в работе [Kozuyeva et al., 2019]. Здесь представлены результаты следующих групп станций: близко расположенные LOZ—B50—RVD, и магнитные и ГИТ станции на тех же геомагнитных широтах IVA—VKH (рис. 9). Теллурические электрические поля были рассчитаны с использованием имеющихся данных об импедансе в диапазоне периодов 8–5000 с из результатов эксперимента BEAR [Korja et al., 2002]. Пространственное распределение электропроводности Восточного Фенноскандинавского щита очень неоднородно. Сравнение импедансов нескольких характерных участков показано на рис. 10. Для периода $T = 90.5$ с наибольшее значение модуля импеданса $|Z|$ приходится на район станций PEL/B31 ($\sim 10 \text{ мВ/км} \cdot \text{нТл}$), а в районе станций

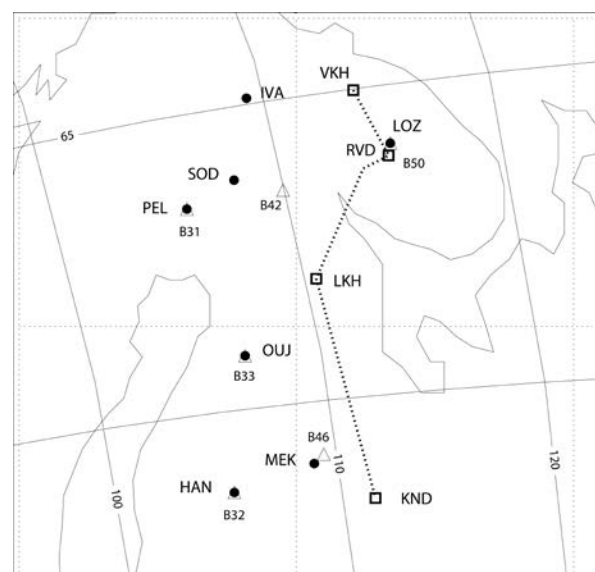


Рис. 9. Магнитные станции IMAGE (черные точки), выбранные пункты МТ-зондирования в проекте BEAR (треугольники) и станции регистрации ГИТ в ЛЭП «Северный транзит»

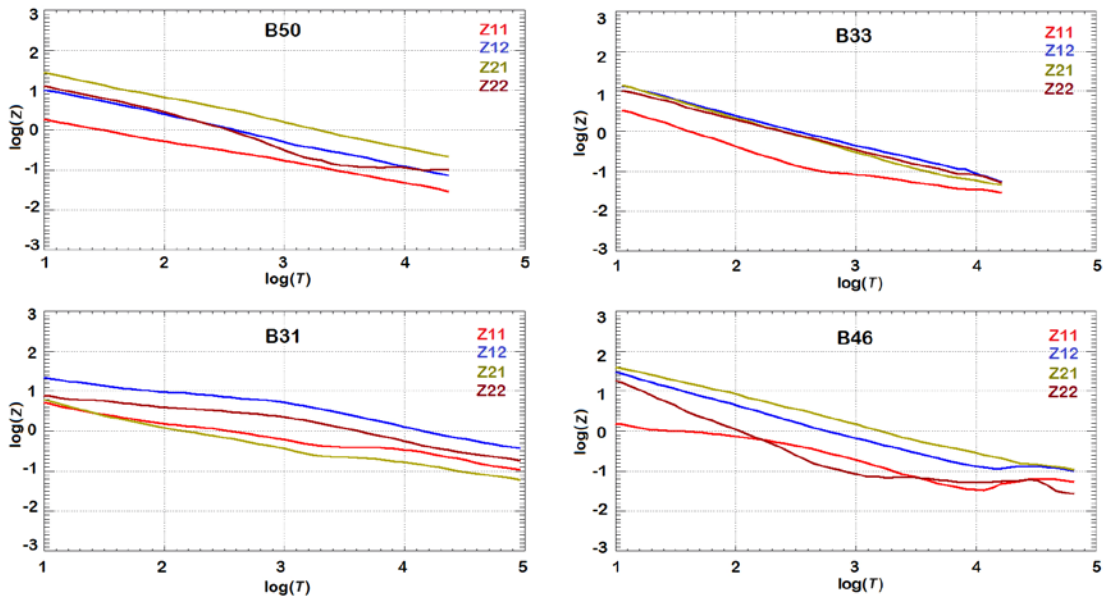


Рис. 10. Зависимость амплитуд элементов тензора импеданса $Z_{i,j}$ (ось X направлена на север, Y — на восток) от периода T на ряде станций сети BEAR

OUI/B33 импеданс в ~ 4 раза ниже (~ 2.4 мВ/км·нТл). Таким образом, для одного и того же магнитного возмущения контраст теллурического электрического поля между разными точками может достигать 3–4 раз. Существенные величины недиагональных элементов тензора Z указывают на то, что геоэлектрические свойства земной коры сильно анизотропны. Временные ряды синтезированных теллурических полей были рассчитаны с помощью фурье-преобразования магнитных вариаций с удаленным трендом по импедансному соотношению (1), и последующего обратного фурье-преобразования от свертки спектра $B(f)$ с импедансом $Z(f)$.

Магнитная буря 12–14 ноября 2012 г. (индекс $|SYM-H| > 100$ нТл) была вызвана быстрыми потоками солнечного ветра. В 00–04 UT 14 ноября произошла серия усилений локального электроджета (индекс $EI \sim 1500$ нТл). до ~ 60 В этот период были зафиксированы интенсивные вариации ГИТ во всех элементах ЛЭП А на терминальной станции VKH. Всплески J происходят синхронно с усилением dX/dt до ~ 100 нТл/с и теллурического поля до нескольких вольт на километр.

Даже визуальное сравнение на рис. 11 показывает, что флуктуации $dX(t)/dt$ являются более высокочастотными по сравнению с вариациями $E(t)$ и $J(t)$. Спектральный анализ одновременных геомагнитных, теллурических и ГИТ-вариаций (рис. 12) подтверждает это. Спектральные компоненты на частотах ~ 4 и ~ 6 мГц выделены в спектре $J(f)$ и $X'(f)$ ($X' = dX/dt$). Эти компоненты обусловлены вкладом быстрых флуктуаций диапазона P13, накладывающихся на усиление аврорального электроджета. В целом спектр $X'(f)$ сильно отклоняется от спектра $J(f)$ на частотах > 5 мГц и оказывается намного ближе к спектру $E_x(f)$. Таким образом, геоэлектрические свойства играют роль фильтра, ослабляющего влияние высоких частот геомагнитной изменчивости dB/dt .

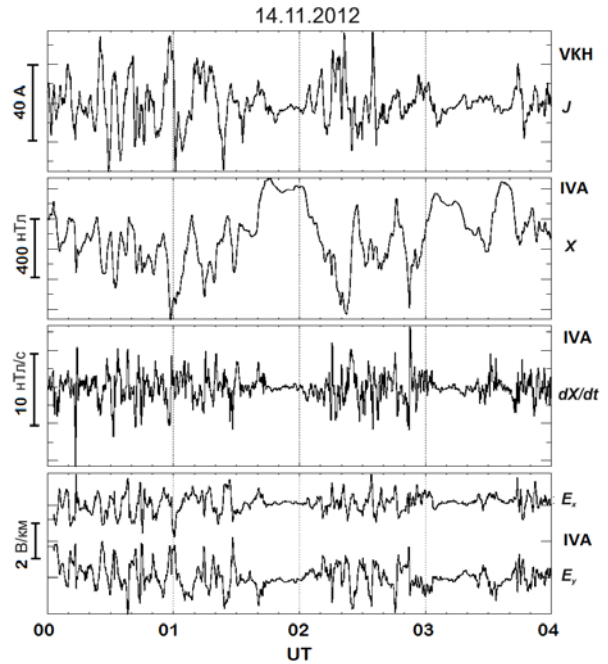


Рис. 11. Интенсивность J [A] ГИТ на ст. VKH, магнитные вариации X [нТл], производная по времени dX/dt [нТл/с] на ст. IVA и теллурические поля E_x [В/км] и E_y [В/км] в пунктах IVA/B5

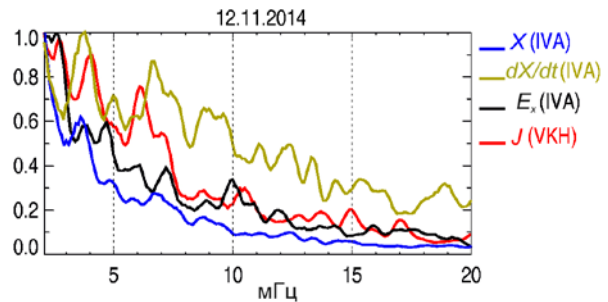


Рис. 12. Нормированные спектры для интервала 01–03 UT события 14 ноября 2012 г.: $J(f)$ в VKH, $X(f)$, $X'(f)$ и $E_x(f)$ в IVA

5.3. Карты возможных значений ГИТ

Информация об электрическом сопротивлении Земли представляет собой большую проблему для геоэлектрического картирования, потому что проводимость земной коры колеблется, по крайней мере, на четыре порядка. В 2006 г. проект EarthScope [<https://www.earthscope.org>] начала МТ-съемку территории США на сетке с расстоянием между станциями 70 км [Schultz et al., 2009]. Проект завершился в 2018 г., когда были завершено МТ-зондирование примерно 2/3 территории Соединенных Штатов. Для каждого места съемки были развернуты мобильные установки, включающие феррозондовый магнитометр и пару электрических диполей для измерения трех составляющих магнитного поля и двух горизонтальных составляющих электрического поля [Love et al., 2017]. Затем одновременные измерения геомагнитного поля и геоэлектрического поля использовались для расчета тензора магнитотеллурического импеданса как функции частоты $Z(\omega)$. Тензоры импеданса, полученные с участков съемки, покрывают диапазон периодов от 10 до 20000 с при расчетной ошибке меньше 5 %.

Эмпирические тензоры импеданса, полученные из МТ-данных EarthScope, были использованы для изучения возможности картирования геоэлектрических полей, индуцированных магнитными возмущениями, и выделения эффектов проводимости Земли [Bedrosian, Love, 2015]. Геологической службой США создана карта синтетических геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться заданным единичным пространственно-однородным геомагнитным возмущением. Такая карта позволяет быстро оценить возможные риски от ГИТ при различных ожидаемых возмущениях. Для геомагнитных колебаний с $T=100$ с векторы индуцированного геоэлектрического поля показывают существенные различия по амплитуде (до 100 раз), направлению (до 130°) и фазе (более четверти длины волны) в разных регионах (рис. 13). Горизонтальные векторы геоэлектрического поля \mathbf{E} , индуцированные синусоидальным геомагнитным полем $B_x(t)$ амплитудой 1 нТл, имеют величины в диапазоне от 1.2 до 33.5 мВ/км.

В работе [Love et al., 2016, 2018] проведена оценка возможных экстремальных значений вариативности геомагнитного поля и геоэлектрических токов для среднеширотной части США. Из анализа данных МТ съемки и архива данных магнитных обсерваторий рассчитаны экстремальные амплитуды геоэлектрического поля, которые могли бы возникнуть один раз в 100 лет. География опасности ГИТ напрямую связана со сложной геоэлектрической структурой, так как геологическое строение существенно влияет на силу и направление геоэлектрических полей, генерируемых магнитными бурями. В частности, модели USGS демонстрируют высокий уровень опасности для магматических и метаморфических пород; напротив, осадочные породы имеют более низкий уровень опасности. Такая карта содержит критически важную информацию для операторов электросетей в случае экстремальных магнитных бурь. Эти карты позволяют коммунальным

предприятиям лучше предвидеть угрозу и реакцию на будущие магнитные бури; карты окажутся полезными для планирования будущих установок электросетей, а также помогут разработать стратегию уменьшения отключений и повреждения энергосистем [Lotz, Danskin, 2017].

5.4. Метод переходных функций для оценки ГИТ в заданных системах при вариациях геомагнитного поля

Ключевым вопросом исследований влияния КП на технологические системы является то, как моделировать ГИТ, которые могут протекать через электрически заземленную инфраструктуру, в частности, ЛЭП. Однако в реальных ситуациях контур, в котором протекают ГИТ, и его характеристики известны очень приблизительно. Реальную связь между спектральным составом магнитных вариаций $\Delta B(f)$ и ГИТ следует определять отдельно для конкретной энергетической системы и конкретного региона. Частотная зависимость $Z(f)$ приводит к тому, что взаимодействие геомагнитного поля с проводящей земной корой действует как фильтр, после которого высокочастотная часть спектра в вариациях теллурического поля оказывается ослабленной по сравнению с $dB/dt(f)$ [Kozugeva et al., 2019]. Этот эффект можно учесть, вводя прокси-теллурическое поле

$$E_p(t) = |F^{-1}\{Z(f)B(f)\}|,$$

где F^{-1} обозначает обратное преобразование Фурье [Marshall et al., 2012, 2017].

В работе [Ingham et al., 2017] авторы использовали подход, основанный на расчете передаточной функции $E_p(t)$ (прокси-теллурическое поле), которая численно описывает реакцию ГИТ на изменения локального геомагнитного поля на разных частотах. Они применили этот метод к обширному набору данных ГИТ для энергосистемы Новой Зеландии. При подходящем масштабировании этот подход можно использовать для моделирования временных вариаций ГИТ в любой конкретной системе при магнитных бурях.

5.5. Модели для вычисления ГИТ в трубопроводе и потенциала труба—почва

Информации о воздействии ГИТ на трубопроводы не так много, наиболее длительные исследования влияния КП на трубопроводы проводились на Финском газопроводе с 1998 по 1999 г. [Pulkkinen et al., 2001a, b]. Эти работы были нацелены на разработку модели для оценки ГИТ в трубопроводе и потенциала труба—почва и для получения статистических предсказаний величины ГИТ и напряжений в разных местах сети трубопроводов [Lundstend, 2006]. Исследование показало, что наибольшие изменения напряжения труба—почва возникают на концах трубопроводов, в то время как наибольшие ГИТ были в средних частях трубопроводов.

Для расчета токов в проводящих системах применялись метод DSTL (Distributed-Source Transmission Line) [Boteler, 1997], метод комплексных изображений [Pirjola, Viljanen, 1998], метод матричных уравнений

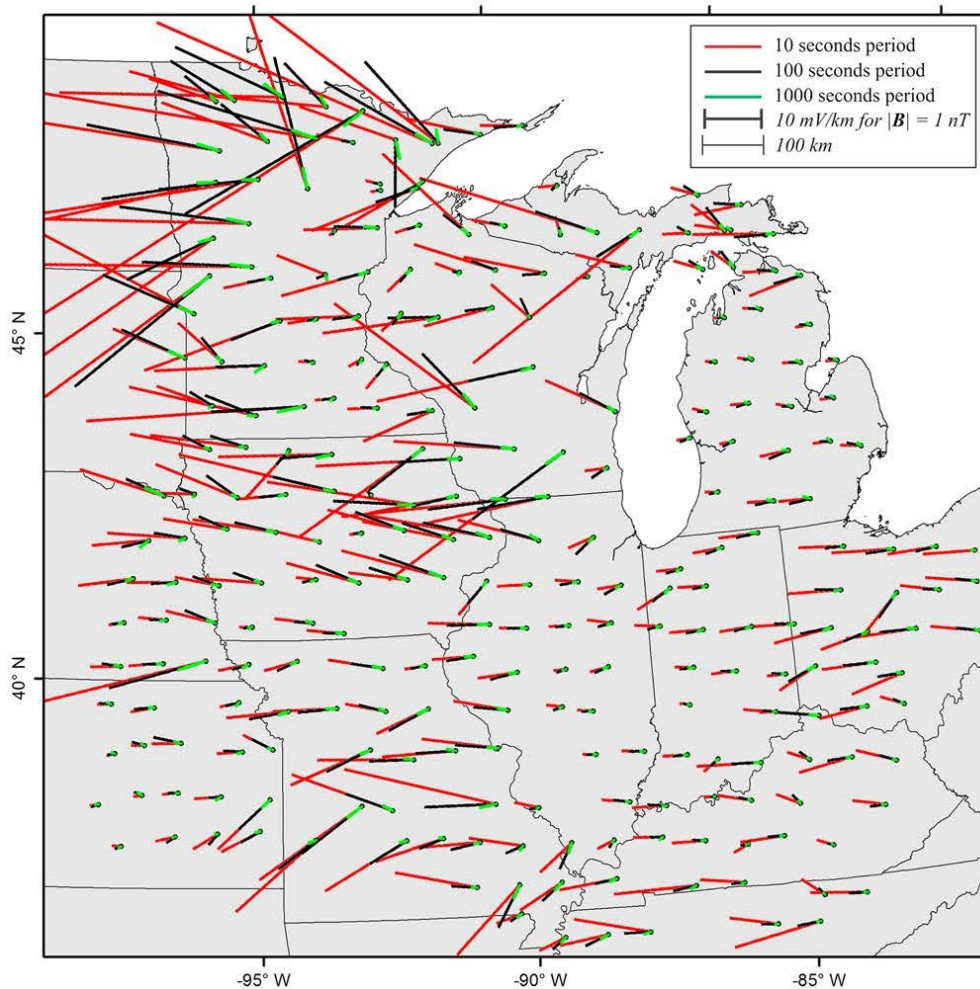


Рис. 13. Векторное поле геоэлектрических возмущений E , индуцированных синусоидальным геомагнитным полем $B_s(t)$, имеющим периоды 10 (красный цвет), 100 (черный) и 1000 с (зеленый) на территории США (из работы [Bedrosian, Love, 2015])

[Lehtinen, Pirjola, 1985], метод элементарных токовых систем (Source Elementary Current System) [Viljanen et al., 1999, 2004], и метода линии передач, в котором матрица проводимости в модели трубопровода строится с учетом параметров заземления отдельных отрезков и ветвей трубы [Boteler, 2013]. Расчеты показали, что величина теллурического напряжения зависит не только от направления и величины теллурического поля, но также от длины и сопротивления трубы заземлению. Эти расчеты, применяемые к современным трубопроводам с хорошим защитным покрытием, позволяют предположить, что влияние земных токов может быть не таким безобидным, как первоначально предполагалось [Gummow, Eng, 2002].

5.6. Влияние резких неоднородностей геоэлектрической проводимости

Для оценки влияния КП на электрические сети в прибрежных регионах необходим учет особенностей структуры проводимости. Оценки рисков должны включать оценки того, могут ли на побережье усиливаться геоэлектрические поля, вызванные геомагнитными возмущениями, оказывая влияние

на ЛЭП в прибрежных зонах. В работе [Tozzi et al., 2019] проведена оценка риска от КП для электрической сети Италии. Она состоит из ЛЭП напряжением 380–400 и 220–275 кВ, а также высоковольтной ЛЭП постоянного тока, проходящей под поверхностью моря до острова Сардиния. Авторы показывают, что значительный ГИТ может протекать в энергосистемах даже в низких геомагнитных широтах во время магнитных бурь и суббурь. Учет близости побережья увеличивает оценку ожидаемых теллурических полей и ГИТ.

Моделирование теллурических полей для реальной трехмерно-неоднородной (3D) структуры проводимости земной коры и верхней мантии при магнитных бурях проводилось в работе [Marshall et al., 2020]. Используя комбинированный подход, включающий 3D-моделирование электромагнитного поля и магнитогидродинамическое (МГД) моделирование ОКП, была успешно смоделирована динамика теллурических полей во время магнитной бури 17 марта 2015 г. Использовались различные модели проводимости, включая реалистичную 3D-модель, полученную на основе данных проекта EarthScope. Показано, что контрасты проводимости оказывают большое влияние не только на

локальное теллурическое поле, но и на глобальное распределение потенциала электрического поля и соответственно на ГИТ. Сравнение моделирования для реалистичного пространственно-неоднородного и плосковолнового приближения, которое является наиболее распространенным подходом к моделированию ГИТ, показало существенные различия результатов даже в средних широтах. Разница особенно велика на границах контрастов проводимости.

Совместные МТ-исследования и изучение распределений потенциала почва—труба являются полезным инструментом выявления в трубопроводах потенциальных опасностей, вызванных ГИТ. При моделировании вариаций потенциала почва—труба, основанном на теории линий передач с распределенным источником, хорошее согласие с наблюдаемым потенциалом достигается при учете скачков импеданса. Таким образом, большая разность потенциалов почва—труба обусловлена наличием резистивных интрузивных тел в верхней коре. В частности, аномально большой потенциал между трубой и почвой наблюдается вдоль газопровода на востоке Онтарио (Канада), где проходит геологический контакт между высокорезистивными породами и более проводящими отложениями, что подтверждает гипотезу о том, что большие вариации потенциала связаны с изменениями проводимости Земли вокруг трубопровода.

6. ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ГИТ

Проблема оценки вероятности экстремальных ГИТ является частью более общей проблемы — определения вероятности экстремальных геофизических событий (землетрясений и магнитных бурь) [Coles, Lam, 1998; Love, 2012]. Самая интенсивная магнитная буря — событие Кэррингтона, была зарегистрирована 1–2 сентября 1859 г. Во время этой бури полярные сияния были видны даже на Гавайях, максимальное возмущение геомагнитного поля $\Delta H \sim 1600$ нТл было зарегистрировано на экваториальной станции Bombay, а значение Dst -индекса было оценено как -850 нТл. После начала космической эры в 1957 г. наиболее мощная магнитная буря с $|Dst| \sim 590$ нТл произошла 13 марта 1989 г. Другие исторически мощные бури отмечались 4 июля 1941 г. ($\Delta H > 700$ нТл) и 24 марта 1940 г. ($\Delta H > 660$ нТл) [Wei et al., 2013].

Делались попытки оценки вероятности повторения таких событий [Cid et al., 2015]. В работе [Riley, 2012] вероятность повторения бури типа Кэррингтона в течение ближайшего десятилетия была оценена в 12 %. По оценке авторов работы [Tsubouchi, Omura, 2007] бури, подобные произошедшей в 1989 г., могут происходить раз в 60 лет. Статистический анализ архива записей магнитных бурь (более ста событий с $\Delta H > 100$ нТл) в обсерватории Kakioka с 1924 г. за 89 лет дал вероятность бури уровня Кэррингтона в ближайшее десятилетие порядка 13%. Если бы буря, подобная буре 13.03.1989 или 01.09.1859, произошла в наши дни, это создало бы серьезные проблемы в работе

технологических систем по всему миру. Согласно некоторым рассчитанным возможным сценариям, возникновение редкой и аномально мощной бури вызовет лавину отказов и сбоев при работе энергетических сетей, в результате возможно разрушающее воздействие на экономику развитых стран [National Research Council, 2008].

Однако, если полагать, что экстремальные магнитные возмущения просто превышает максимально наблюдаемые при инструментальных наблюдениях величины в заданное число раз ($10, 3\sigma$), настройка на такие необоснованно большие значения потребовала бы необоснованных расходов. В качестве экстремального ГИТ предполагается считать значение, возникающее один раз в 100 лет [Pulkkinen et al., 2008, 2012]. Оценку экстремального события получают, анализируя статистическое распределение частоты появления возмущений заданной амплитуды для изучаемого региона. Аппроксимация полученной зависимости частоты появления на событие с частотой один раз в 100 лет и дает экстремальное значение для данного региона [Bernabeu, 2013]. Анализируя архив геомагнитных данных, можно оценить вероятности появления экстремальных геомагнитных возмущений на разных широтах. Комбинируя эти данные, можно составить региональную карту геомагнитных рисков, подобную карте сейсмической опасности, — максимально возможное количество происходящих раз в столетие геоэлектрических возмущений. С помощью такого подхода проводятся оценки экстремальных теллурических полей и ГИТ для различных регионов [Langlois et al., 1996].

6.1. Статистические методы оценки экстремальных событий

Вид функции вероятности $F(x)$ амплитуды возмущения x определяется физическими механизмами изучаемого процесса. Так, под действием случайных независимых воздействий формируется нормальное гауссово распределение; в замкнутой системе энергии 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 лог-нормальному распределению 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. Не зная в полной мере характер распределения, а опираясь только на средние значения, можно прийти к ложным заключениям о свойствах системы.

В геофизических исследованиях часто встречаются логнормальное распределение (σ — параметр формы)

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

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

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

Распределение экстремальных значений описывается обобщенным распределением с совокупной вероятностью p , которая определяется как

$$p(X < x) = \exp \left\{ - \left[1 + \gamma \frac{x - \mu}{\sigma} \right]^{-1/\gamma} \right\},$$

где параметры σ и μ являются положительными значениями. Для параметра $\gamma > 0$ эта функция вероятности называется распределением Фреше (Fréchet), а случай $\gamma < 0$ относится к распределению Вейбуля (Weibull).

В распределении экстремальных значений некоторый уровень принимается за порог для хвоста. Зависимость выше порогового уровня может быть экстраполирована для оценки экстремальных значений с периодом возврата T (например 50 и 100 лет). Период возврата T может быть рассчитан с использованием кумулятивной функции вероятности $T = [1 - p(X < x)]^{-1}$.

6.2. Оценки экстремальных значений вариабельности геомагнитного поля и теллурических полей

Магнитные данные (ряд более 40 лет), зарегистрированные в 13 геомагнитных обсерваториях, анализировались для оценки экстремальных уровней геомагнитной и геоэлектрической активности в разных местах Канады [Nikitina et al., 2016]. В качестве мер геомагнитной активности использовались часовые диапазоны вариаций геомагнитного поля ΔB и среднечасовые максимумы скорости изменения магнитных вариаций dB/dt . В авроральной зоне расчетные экстремальные значения возмущений за 50 лет находятся в диапазоне $\Delta B = 1750 \div 2560$ нТл, а за 100 лет $\Delta B = 1950 \div 3000$ нТл. В субавроральной зоне экстремальные значения оказались даже выше: $\Delta B = 3880$ нТл за 50 лет и $\Delta B = 4630$ нТл за 100 лет. Это может быть связано с тем, что расширение авроральной зоны во время магнитных бурь приводит к увеличению магнитной активности на этих широтах. Очень высокие значения максимально возможных возмущений были получены вблизи области каспа — на ст. Iqaluit $\Delta B = 6870$ нТл за 50 лет и $\Delta B = 9170$ нТл за 100 лет. Скорость изменения геомагнитных полей на субавроральных станциях за 50 лет может достигать значений $dB/dt = 490 \div 605$ нТл/мин, а за 100 лет $dB/dt = 600 \div 680$ нТл/мин. Для экстремальных значений в геоэлектрических полях локальный максимум прогнозируемых значений достигается вблизи границы между субавроральными и авроральными зонами: $\Delta E = 3610$ мВ/км за 50 лет и $\Delta E = 4060$ мВ/км за 100 лет. Очень большие прогнозируемые значения ($\Delta E = 7900$ мВ/км за 50 лет и $\Delta E = 9970$ мВ/км за 100 лет) получены для касповых станций.

Сценарий экстремального возмущения типа «один раз в 100 лет» использован в [Pulkkinen et al., 2012] для оценки распределений производной горизонтального магнитного поля (для данных с шагом по

времени 10 с) и геоэлектрического поля в зависимости от геомагнитной широты и проводимости земли. Для событий марта 1989 г. и октября 2003 г. наибольшие значения электрического поля достигались примерно на широте $55^\circ - 60^\circ$. При моделировании электрического поля в условиях минимальной и максимальной проводимости земной коры были получены максимальные значения поля 20 и 5 В/км соответственно.

Резкие границы в распределении амплитуд максимальных значений геоэлектрического поля и производной геомагнитного поля, примерно совпадают с резкой границей возмущенного геомагнитного поля на широте $\sim 55^\circ$ [Thomson et al., 2011]. По всей видимости, эффект формирования границы может объясняться расположением аврорального электроджета, вносящего основной вклад в возбуждение геоэлектрического поля при развитии возмущения.

7. РС-ИНДЕКС ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И СБОИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Во время воздействия выбросов корональной массы (СМЕ) на магнитосферу Земли, приводящих к интенсивным магнитным бурям, возросший поток солнечных протонов может привести к отключению ключевых приборов на межпланетных спутниках (как это произошло с ACE перед бурей 29 октября 2003 г.), которые используются для прогноза солнечного ветра. В результате стандартные спутниковые системы прогноза КП не будут функционировать. Такие интенсивные высокоэнергетические солнечные потоки протонов обычно сопровождают самые большие солнечные вспышки. В этом случае использование специализированных геомагнитных индексов может дать предупреждение о магнитной буре в качестве поддержки отсутствующего прогноза, получаемого с межпланетных аппаратов типа ACE/WIND [Trichtchenko, Boteler, 2004].

Мониторинг геомагнитных индексов может давать дополнительные предупреждения о возмущениях КП операторам энергетических систем. Перспективным индексом может быть PC (Polar Cap) — индекс, рассчитываемый по магнитным вариациям в полярных шапках [Troshichev, Janzhura, 2012]. Эти вариации вызваны ионосферными токами, связанными с конвекцией ионосферной и магнитосферной плазмы над полярными шапками. Трансполярная конвекция управляется электрическим полем утро — вечер, возникающим в результате электродинамической связи между полярной шапкой и солнечным ветром. Таким образом, индекс PC может характеризовать электрическое поле солнечного ветра, приложенное ко всей магнитосфере. Это электрическое поле вызывает трансполярную конвекцию плазмы, соответствующую движению плазмы из хвоста к Земле. Эта конвекция потенциально нестабильна и может приводить к магнитосферным суббурям. Возникновение высоких уровней PC может быть индикатором готовящейся суббури. Следовательно, мониторинг уровня PC может предоставить прогноз возможных суббурь и вызываемых ими нарушений работы электросети. На состояние тревоги указывает пороговый уровень $PC = 10$ мВ/м [Stauning, 2013].

8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГИТ

Известны многочисленные примеры катастрофических последствий сильных магнитных бурь, имевшие место в США, Канаде, Скандинавии и Японии [Lanzerotti, 2001]. Однако даже при отсутствии катастрофических нарушений ГИТ вызывают насыщение трансформаторов и нарушают управление напряжением, так что при этом растут потери в трансформаторе и возникают перегрузки при передаче электроэнергии [Oughton et al., 2017]. Например, во время магнитных бурь 15.07.2000 и 31.03.2001 лимит на передачу энергии был понижен операторами электрической сети PJM (США) на 20 % [Forbes, 2004]. Одновременно упал и фактический объем передаваемой энергии. Недостаток энергии привел к повышению текущих региональных цен почти в четыре раза. Эконометрический анализ, учитывающий влияние всех возможных факторов, показывает, что даже относительно небольшие магнитные бури влияют на текущие цены. Только за полтора года (июнь 2000 – декабрь 2001) экономическое влияние КП на энергетическую систему США составило \$500 миллионов.

Серьезные экономические последствия для глобального рынка электроэнергии проявляются даже тогда, когда катастрофических нарушений, вызванных КП, не наступает. В работе [Forbes, St. Cyr, 2008] показано, что рыночные цены на различных национальных рынках электроэнергии статистически связаны с локальными геомагнитными возмущениями. Даже если во время магнитных бурь не происходит потеря технологического оборудования, ГИТ в региональных энергетических сетях оказывают существенное влияние на устойчивость экономики [Schrijver et al., 2014, 2015]. Эти и многие другие примеры диктуют необходимость более глубокого изучения влияния КП на мировую инфраструктуру. Приведенные выше оценки учитывают только прямой ущерб от воздействия КП, однако косвенные потери для мировой экономики могут быть значительно больше [Schulte in den Baumen et al., 2014].

В совместном пресс-релизе AGU и BAS от 18.01.2017 оценены прямые и косвенные экономические потери США от временного выхода из строя энергетических сетей под действием ГИТ, аналогичного блэкауту в Квебеке в 1989 г. Национальная энергетическая система США включает более 6000 генерирующих мощностей, более 800000 км передающих линий и бесчисленное число понижающих трансформаторов. Все эти элементы могут оказаться потенциальными точками для втекания ГИТ через их заземление. Эта огромная сеть контролируется более чем 100 центрами, ответственными за оперативное управление работой сети. На сегодняшний день неясно, когда операторам сетей можно давать сигнал тревоги или отбоя, так как нельзя с надежностью сказать, когда магнитная буря начнется и закончится. Мощные солнечные вспышки происходят часто, но выброс облака солнечной плазмы не всегда направлен в сторону Земли.

Хотя вероятность экстремальной магнитной бури — уровня события Кэррингтона 1859 г., отно-

сительно невелика в заданный момент времени, но почти неизбежно, что она в конце концов произойдет. Была оценена вероятная зона отключения и ежедневный потерянный ВВП в соответствии с различными сценариями развития магнитной бури [Eastwood et al., 2017]. Если магнитная буря охватывает геомагнитные широты $55^{\circ} \pm 2.75^{\circ}$, это приводит к прямым экономическим потерям для экономики США в размере \$3.2 млрд в день (8 % от ежедневного ВВП). Сценарий, при котором магнитная буря охватывает геомагнитные широты $45^{\circ} \pm 2.75^{\circ}$, приводит к экономическим потерям в размере \$16.5 млрд в день. Наконец, сценарий, когда магнитная буря охватывает широты $50^{\circ} \pm 7.75^{\circ}$, приводит к потенциальным экономическим потерям для экономики США в размере \$41.5 млрд в день в сочетании с ежедневными потерями для мировой экономики в \$7 млрд [Oughton et al., 2017].

Обычно оценки возможного ущерба из-за экстремальной КП сосредоточены на прямых экономических затратах в зоне отключения, а косвенные потери внутренних и международных цепочек поставок во внимание не принимаются. В среднем прямые экономические затраты, связанные с перебоями с электричеством, составляют всего 49 % от общей потенциальной макроэкономической стоимости. По наиболее экстремальному сценарию отключения электроэнергии, затрагивающему 66 % населения США, ежедневные внутренние экономические потери могут составить \$41.5 млрд. плюс дополнительные \$7 млрд. возникнут из-за нарушения международной цепочки поставок. Мнения экспертов по электротехнике разделились по вопросу о возможной серьезности отключений, вызванных сильной магнитной бурей. Некоторые полагают, что перебои в работе будут длиться всего несколько часов или дней, потому что электрический сбой в системе передачи энергии защитит электрогенерирующие объекты, в то время как другие опасаются, что отключение электроэнергии может длиться недели или месяцы, потому что многие трансформаторы будут повреждены и потребуются их замена.

Из-за возможного риска для производства, Федеральная комиссия по регулированию энергетики США потребовала от Североамериканской корпорации надежности электроснабжения разработки стандартов надежности для смягчения потенциального воздействия геомагнитных возмущений на работу национальной электроэнергетической системы [Jonas, McCarron, 2015].

9. ГИТ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМАХ И СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В технологически развитых странах активно ведутся работы по созданию систем мониторинга и прогноза воздействия различных факторов КП на наземные технологические и спутниковые системы [Weigel et al., 2003]. Однако полученные результаты являются коммерческой собственностью и недоступны для детального анализа мировым научным сообществом. Необходимо учитывать также, что со времени Кве-

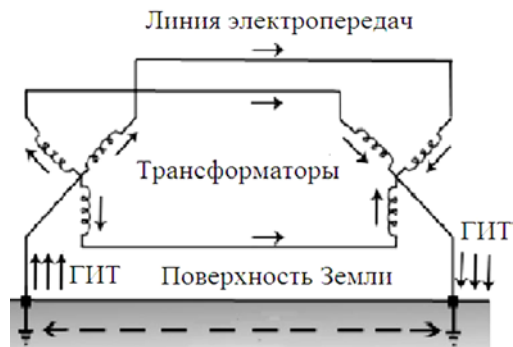


Рис. 14. Токовый контур, образуемый ГИТ в трехфазной электрической сети

бекской аварии кардинально изменился состав потребителей электрической энергии — произошло насыщение сетей нелинейными потребителями [Pirjola, 1985b], что существенно увеличило вероятность деструктивного проявления ГИТ.

Частота ГИТ 0.001–1 Гц мала, и для сетей, использующих стандарт 50–60 Гц, они эквивалентны постоянному току. В трехфазной электрической сети ГИТ протекают через нейтраль и обмотки трансформаторов, как показано на рис. 14. Такой путь протекания ГИТ приводит к подмагничиванию магнитопроводов трансформаторов и смещению рабочей точки, как показано на рис. 15 [Вахнина, Кретов, 2012а, б]. Подобное смещение рабочей точки приводит к искажению формы тока намагничивания, что эквивалентно появлению высших гармоник в спектре тока намагничивания.

Наличие высших гармоник сети имеет целый ряд последствий для устойчивости функционирования энергосистем [Карташев, Динь-Дык, 2007], но здесь мы отметим лишь одно, которое сыграло ключевую роль в Квебекских событиях. Увеличение частоты при росте вклада высших гармоник приводит к ухудшению диэлектрических свойств материалов, входящих в состав электроустановок и, следовательно, к увеличению тепловых потерь. В свою очередь, нагрев материала ухудшает его диэлектрические свойства, создается положительная обратная связь, приводящая в конце концов к пробое диэлектрика и выходу из строя электроустановки, что и наблюдалось в Квебекских событиях.

Поскольку на одном из этапов развития процесса происходит увеличение уровня гармоник, логично использовать эту аномалию в качестве источника информации о воздействии ГИТ. Проблема высших гармоник сети приобретает особое значение из-за массового применения высокотехнологического оборудования с нелинейными электромагнитными характеристиками [Girgis, Vedante, 2015]. Когда нелинейные потребители составляют незначительную часть (до 10 %) мощности системы электропитания, их влияние на сеть и ее элементы минимально и не приводит к существенным негативным последствиям. В противном же случае следует быть готовым к возникновению различного рода нарушений, иногда и аварийных ситуаций. Дополнительный нагрев от токов высших гармоник может привести к перегреву проводов нейтрали и преждевременному срабатыванию защитных устройств (предохранителей

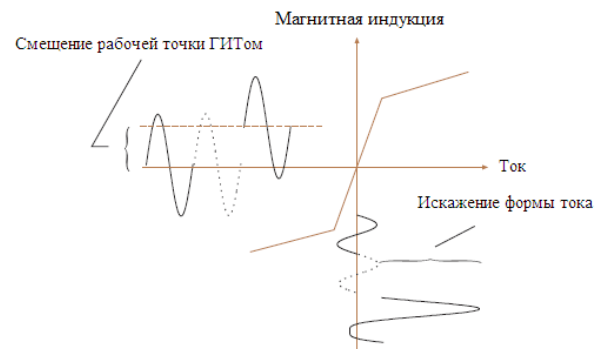


Рис. 15. Качественная иллюстрация механизма искажения гармонического состава тока в трансформаторе, находящемся под нагрузкой ГИТ. Показано, как происходит смещение рабочей точки, искажение формы тока и появление высших гармоник в спектре тока

и автоматических выключателей) [Вахнина, Кретов, 2012а, б; Гуревич, 2010, 2014]. Высшие гармоники вызывают в стали сердечника магнитопровода дополнительные потери на перемагничивание и вихревые токи.

Перегрев трансформатора резко сокращает срок его службы. Для ограничения перегрева приходится сокращать передаваемую мощность или заведомо завышать установленную мощность самого трансформатора [Martí et al., 2013]. Гармоники существенно увеличивают потери в электродвигателях. Здесь, кроме потерь в меди и стали, аналогичных потерям в трансформаторе, из-за значительной разницы скоростей вращающихся полей, создаваемых высшими гармониками и ротором двигателя, возникают дополнительные потери в демпферных обмотках и магнитопроводе двигателя. Длительное воздействие ГИТ может приводить к кумулятивному эффекту, сокращающему операционную жизнь трансформатора [Albertson et al., 1992].

Основное воздействие ГИТ на электроэнергетические системы заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов [Карпенпан et al., 1981]. Проходя через заземленную нейтраль силового трансформатора, ГИТ производят дополнительное одностороннее подмагничивание магнитной системы силового трансформатора. При работе сердечника силового трансформатора в нелинейной части гистерезиса часть магнитного потока вытесняется из сердечника, создавая поток рассеяния. Поток рассеяния вызывает дополнительный нагрев металлических элементов конструкции и токоведущих частей силовых трансформаторов и, как следствие, нагрев масла. Вследствие насыщения магнитной системы силовых трансформаторов возрастают несинусоидальные намагничивающие токи, которые также циркулируют по электрической сети. Силовой трансформатор с сердечником, функционирующим в нелинейной части петли гистерезиса, становится генератором высших гармоник, кратных рабочей частоте. В энергетической системе увеличивается потребление реактивной мощности и снижается пропускная способность сети, происходит падение напряжения, возможны ложные срабатывания релейной защиты и автоматики и, как следствие, нарушение нормальной работы для потребителей [Гусев и др., 2020].

Исследования электрических сетей различной конфигурации показали, что наиболее интенсивному воздействию ГИТ будут подвержены силовые трансформаторы (автотрансформаторы) тупиковых подстанций при совпадении трассы воздушных линий электропередачи с направлением геоэлектрического поля. Менее подвержены воздействию ГИТ трансформаторы (автотрансформаторы) проходных подстанций, если географическое направление воздушных ЛЭП до и после подстанции остается неизменным.

Примером комплексного подхода к обеспечению безопасности энергосистемы является реконструкция, выполненная на энергосистеме Квебека. После катастрофической аварии в марте 1989 г. компания Hydro Quebec существенно пересмотрела организацию защиты энергосистемы от возможных магнитных бурь. Энергосистема снабжена 17 пунктами регистрации ГИТ, в районе расположения ЛЭП помимо основной геомагнитной обсерватории размещены шесть новых магнитометров. Изменение параметров энергосистемы, интенсивность ГИТ в каждом узле, уровень гармоник, изменение температуры в критических точках контролируются специальной программой, моделирующей работу сетей системы 500 и 300 кВ [Martí, Yiu, 2015]. Общие затраты на модернизацию системы составили примерно \$1.2 млрд.

10. РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИТ

В Канаде, США и скандинавских странах активно ведутся работы по созданию систем мониторинга и прогноза воздействия различных факторов КП на наземные технологические системы. Однако они имеют большей частью региональный характер и непосредственно не могут быть применены к региону Российской Арктики.

10.1. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов

Знание статистических связей необходимо в качестве первого шага для построения диагностических моделей величины ГИТ на основании общих характеристик КП. Возможность разработки и апробации статистических моделей ГИТ предоставляют данные регистрации токов в ЛЭП «Северный транзит» на Кольском полуострове. Поскольку в непосредственной близости от ЛЭП магнитометрические наблюдения невозможны, могут быть использованы данные магнитных станций в изучаемом регионе, принадлежащие сети IMAGE [www.geo.fmi.fi/image].

В работе [Vorobev et al., 2020] построены гистограммы средних значений за 2015 г. различных характеристик геомагнитной возмущенности и ГИТ для 1-часовых интервалов местного времени (LT). Суточный ход магнитного возмущения $|\Delta X|$ на ст. IVA (рис. 16) показывает наличие полуночного (LT~24) и послеполуночного (LT~15) максимумов. Эти мак-

симумы вызваны интенсификацией западного и восточного электроджетов над станцией во время суббуревых активизаций. Суточный ход вариабельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ имеет иной характер с широкими ночным (LT~21±01) и утренним (LT~5±6) максимумами. Ночной максимум, очевидно, связан с усилением западного электроджета. Повышенная вариабельность поля в утренние часы, предположительно, обусловлена интенсивными геомагнитными пульсациями диапазона Pc5–Pi3, которые наблюдаются наиболее часто именно в эти часы. Большие значения $|d\mathbf{B}/dt|$ при появлении Pi3-пульсаций отмечались Яговой и др. [2018]. Суточный ход средней интенсивности ГИТ на ст. VKH повторяет ход вариабельности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$.

Проведенный в [Viljanen, Tanskanen, 2011; Viljanen et al., 2012] расчет суточного хода $d\mathbf{B}/dt$ за многолетний период на высокоширотных станциях сети IMAGE также показал наличие утреннего и полуночного максимумов, относительные величины которых варьировали в зависимости от сезона. Восстановление аврорального электроджета вдоль меридиана ~22° E по данным сети IMAGE дало следующие закономерности суточного хода: восточный электроджет преобладает в послеполуночные часы (13–21 MLT), в остальное время преобладает западный электроджет с максимумом в ~01:30 MLT. Утренний максимум в суточном ходе $|d\mathbf{B}/dt|$ не имеет соответствия в распределении интенсивности возмущений, создаваемых электроджетом, а в области максимального восточного электроджета не наблюдается увеличения уровня вариаций $|d\mathbf{B}/dt|$.

Насколько геомагнитные индексы, характеризующие суббуревую активность (AE , PCN и др.), достаточны для предсказания величины ГИТ? Для этого авторы работы [Vorobev et al., 2020] провели расчет корреляционных связей между абсолютной величиной ГИТ $|J|$, регистрируемого на ст. VKH, и основными геомагнитными индексами за 2015 г. Максимальная корреляционная зависимость между $|J|$ и глобальными индексами наблюдается для индексов AE ($R=0.56$) и AL ($R=0.55$). Хотя считается, что PCN -индекс хорошо характеризует суббуревую активность, корреляция ГИТ с AE -индексом оказывается выше, чем с PCN -индексом ($R=0.44$). Вариабельность поля $|d\mathbf{B}/dt|$ также зависит от суббуревой активности, характеризуемой AE -индексом. Однако коэффициент корреляции с AE -индексом $R\sim 0.6$ соответствует коэффициенту детерминации $D=R^2\sim 0.36$, т. е. вариабельность поля только на ~40 % определяется интенсивностью электроджета (AL -индексом).

Корреляционные связи $|J|$ со скоростью изменения горизонтальных компонент магнитного поля $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$ оказываются выше, чем с магнитудой возмущения поля $|\Delta X|$, $|\Delta Y|$ в среднем на 31.5 %. При этом вклад вариабельности Y -компоненты в интенсивность $|J|$ соизмерим с вкладом вариабельности X -компоненты как для периода магнитной бури, так и для небуревых интервалов. Этот результат подтверждает, что производная поля $d\mathbf{B}/dt$ флуктуирует не только по величине, но и по направлению, что действительно может быть вызвано наличием

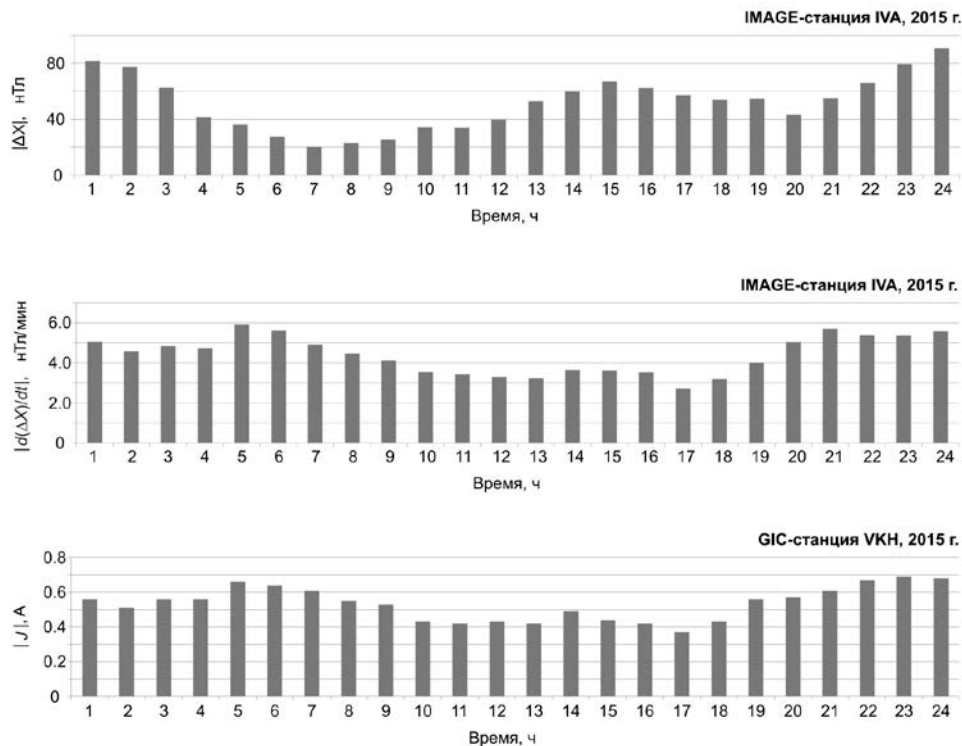


Рис. 16. Суточный ход средней величины магнитного возмущения $|\Delta X|$ за 2015 г. на ст. IVA (верхняя панель); суточный ход средней величины вариальности геомагнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ на ст. IVA (средняя панель), суточный ход средней интенсивности ГИТ $|J|$ на ст. VKH (нижняя панель)

быстропеременных локальных вихревых структур, наложенных на магнитное поле аврорального электроджета.

10.2. Регрессионная модель геоиндуцированных токов

Для решения прикладных вопросов важно знать, какой величины ГИТ можно ожидать при текущем состоянии электроджета, характеризуемом AE -индексом, и уровне вариальности геомагнитного поля.

Для ответа на этот вопрос строятся статистические модели на основе либо нейронных сетей [Gleisner, Lundstedt, 2001], либо регрессионного анализа. Например, в работе [Vorobev et al., 2020] синтезирована линейная регрессионная модель в виде

$$|J| = w_0 + \sum_{i=1}^N (w_i \cdot C_i) \pm \Delta, \quad (2)$$

где C_i — управляющие параметры ($i=1, N$); w — весовые коэффициенты модели; Δ — средняя ошибка моделирования. Модель вида (2) позволяет по значениям N управляющих параметров C_i оценить статистически величину ГИТ $|J|$. Если строить модель по всем зарегистрированным значениям, она будет определяться малыми возмущениями ГИТ, которые не очень интересны. Поэтому для построения регрессионной модели отбирались значения только больше определенного порога. Линейные регрессионные модели построены для AE -индекса и вариальности магнитного поля $|d\mathbf{B}/dt|$ на ст. IVA.

$$\begin{aligned} |J| &= w_0 + w_1 |d\mathbf{B}/dt| \pm \Delta_1, \\ |J| &= w_0 + w_2 |AE| \pm \Delta_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Расчет за 2015 г. по редуцированной модели (с исключением из выборки $|d\mathbf{B}/dt| < 1$ нТл/мин) для ст. IVA дает следующие значения коэффициентов: $w_0=0$, $w_1=0.074$ А·мин/нТл и $w_2=0.0022$ А/нТл. На рис. 17 приведен результат сопоставления модельных значений ГИТ с фактическими наблюдениями сложной магнитной бури 17 марта 2015 г. с серией суббуревых активизаций. Сопоставление модельных значений (3) с измеренными 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, но недооценивает экстремальные значения. На рассматриваемом временном интервале модели (2) обеспечивают среднюю ошибку $\Delta_1 = \pm 0.91$ А и $\Delta_2 = \pm 1.78$ А. В целом, статистическая модель с использованием параметра $|d\mathbf{B}/dt|$ хорошо работает (малые Δ_1) для промежуточных значений $|d\mathbf{B}/dt|$, вероятность появления которых составляет не менее $\sim 1\%$ (статистически это соответствует $|d\mathbf{B}/dt| < 40$ нТл/мин и уровню $|J| < 3$ А) и для промежуточных значений AE -индекса. Для больших значений ГИТ ($|J| > 20$ А) регрессионная модель на основе данных о вариальности поля имеет вид (17) при $\Delta_1 = \pm 2.3$ А, $w_0 = 11.677$ А, $w_1 = 0.11$ А·мин/нТл. При этом моделирование больших величин ГИТ на основе AE -индекса приводит к существенным ошибкам и становится нецелесообразным.

10.3. Статистические распределения вариаций ГИТ и геомагнитного поля

Знание статистического распределения вероятности флуктуаций позволяет оценить вероятность

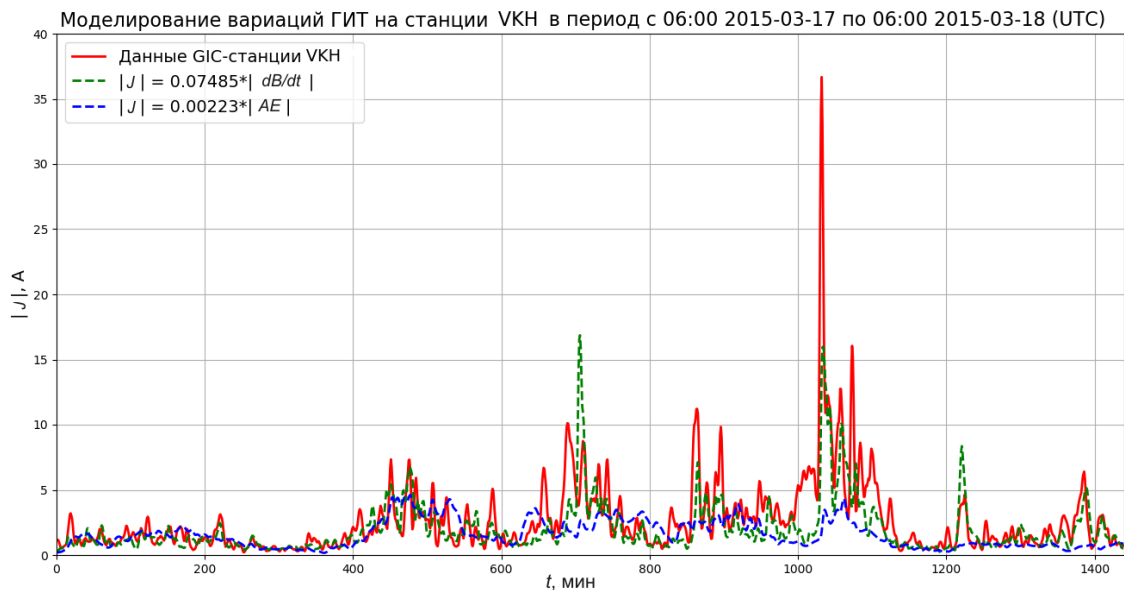


Рис. 17. Результат моделирования ГИТ для периода бури с 00:00 по 24:00 UT 17 марта 2015 г. с помощью регрессионных моделей (3)

экстремального события, которое в период наблюдения может даже не наблюдаться (в предположении, что оно подчиняется тем же закономерностям). По кривой вероятности можно оценить статистически, какое максимальное возмущение возможно для заданного периода наблюдения.

Распределение плотности вероятности значений возмущения компоненты поля $|\Delta X|$ на ст. SOD за 2015 г. в наибольшей степени соответствуют обобщенному распределению Парето (рис. 18). Распределение плотности вероятности значений $|dB/dt|$ и $|J|$ в наилучшей степени аппроксимируется логнормальным распределением (рис. 19). Результаты, приведенные для ст. SOD, аналогичны и для других станций сети IMAGE.

Полученные негауссовы распределения позволяют корректно определить медиану, математическое ожидание и вероятность наблюдения анализируемых параметров в заданном диапазоне, оценить принадлежность зарегистрированных значений к аномальному. Статистика показывает, что $|AE| > 1000$ нТл наблюдается $\sim 1\%$ 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 $\sim 9.7\%$.

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 расхождение экспериментальных кривых и предполагаемого распределения. Статистика распределения значений $|\Delta X|$ достаточно хорошо опи-

сывается обобщенным распределением Парето, а вариабельность поля и ГИТ лучше соответствуют логнормальному закону распределения. Тот факт, что распределение вероятности как $F(|J|)$, так и $F(|dB/dt|)$, 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 имеет логнормальный вид, показывая, что она в значительной степени ответственна за вариабельность геомагнитного поля и тем самым — за явление ГИТ.

По-видимому, планетарные индексы (типа AE) не могут выявить условия, при которых возникают экстремальные значения токов на выбранной подстанции. Более точно ГИТ могут характеризовать региональные геомагнитные индексы. Величина же локального ГИТ определяется не только локальной величиной dB/dt и геоэлектрическими условиями, но и пространственными соотношениями между размерами ЛЭП и масштабом быстрых геомагнитных возмущений [Сахаров и др., 2021; Yagova et al., 2021].

11. ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ, ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА И РИСКА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНОГО МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ прошедших событий может дать рекомендации для понимания физических основ влияния КП на работу технологических систем и улучшения методов его прогнозирования. Хотя примеры моделирования ГИТ для отдельных событий выглядят довольно убедительно, задача прогнозирования воз-

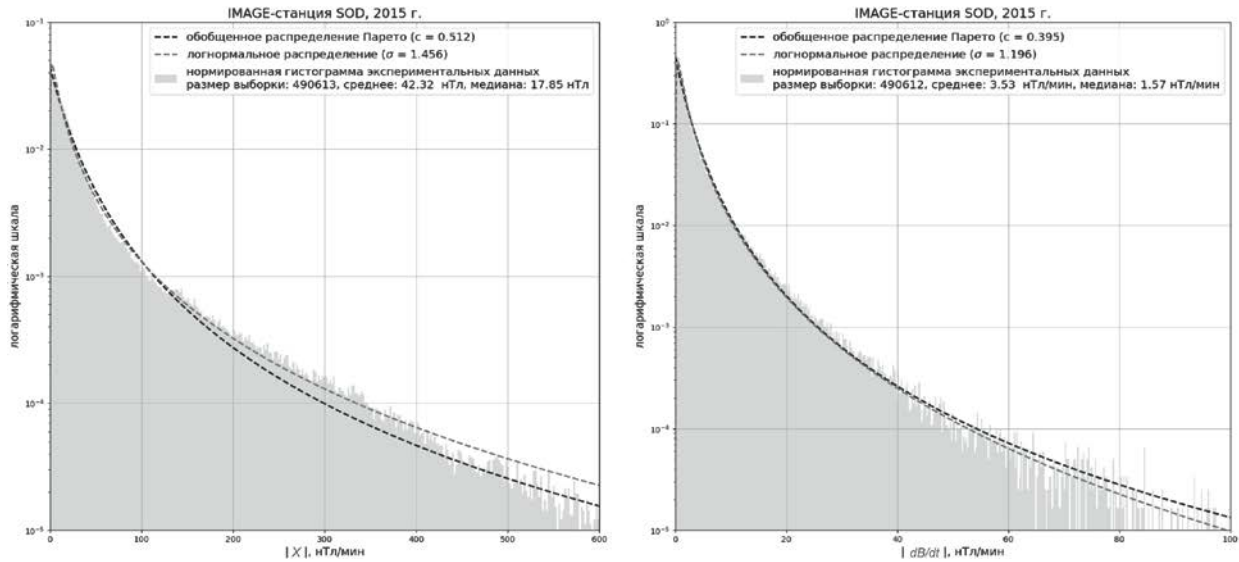


Рис. 18. Распределения плотности вероятности возмущения геомагнитного поля $|\Delta X|$ и вариабельности геомагнитного поля $|dB/dt|$ для ст. SOD за 2015 г.

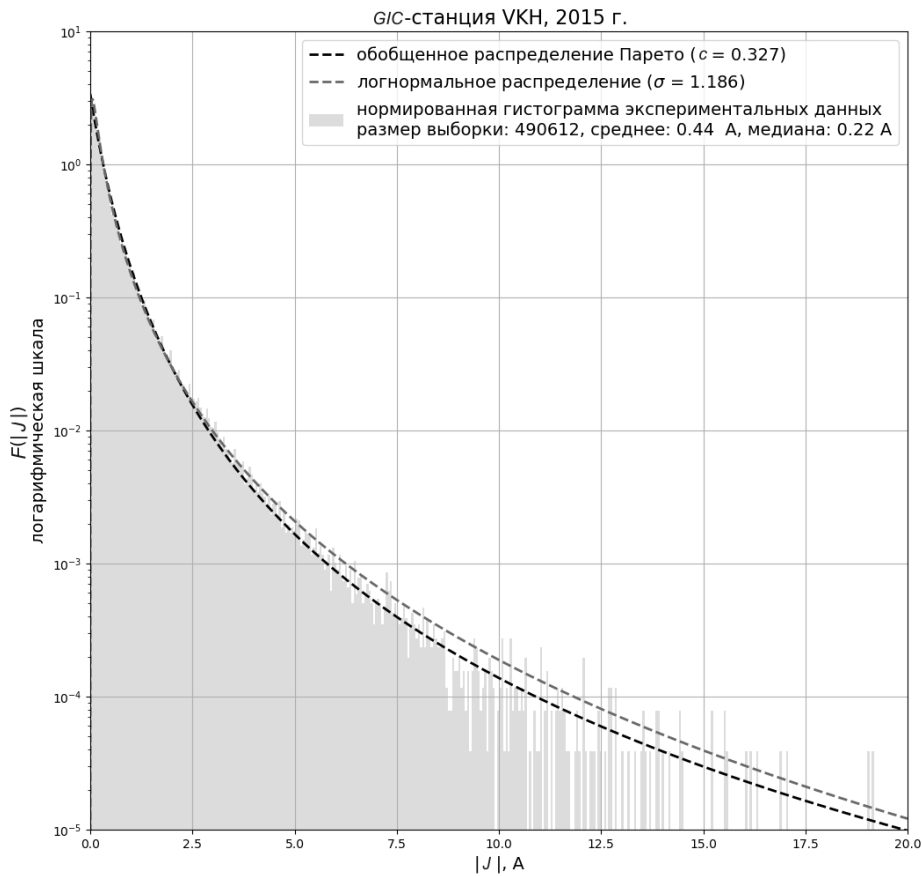


Рис. 19. Распределение плотности вероятности значений ГИТ для ст. VKH за 2015 г.

можных ГИТ на основе моделей, описывающих развитие возмущений КП от солнечного ветра до земной поверхности, еще далека от своего решения. Постоянно ведущиеся наблюдения солнечного ветра в точке либрации L1 между Землей и Солнцем позволяют на практике построить прогноз с горизонтом 30–60 мин. Такой прогноз ГИТ, по крайней мере, за час до ожидаемых экстремальных событий был бы исключительно важен, потому что для крупных

промышленных систем работы по защите трансформаторов могут занять 1–2 ч. При этом требуется, чтобы ожидаемая величина dB/dt предсказывалась конкретно для тех мест, где находятся технологические системы, хотя пространственное разрешение прогностической модели может быть довольно низким (порядка 100 км).

Фундаментальной причиной геомагнитных возмущений являются глобальные процессы на Солнце,

в солнечном ветре и магнитосфере. Основная причина больших ГИТ или, что практически эквивалентно, больших dB/dt , являются СМЕ [Kataoka, Pulkkinen, 2008]. Авторы работы [Huttunen et al., 2008] сопоставили эффективность генерации больших ГИТ различными структурами СМЕ (sheath, ejecta, boundary layers). Когда СМЕ взаимодействует с магнитосферой, наиболее интенсивные ГИТ наблюдаются при прохождении турбулентного участка (sheath) оболочкой плазменного облака, что обусловлено ее способностью вызывать суббури и создавать повышенный уровень магнитосферной турбулентности. Наибольшие по величине ГИТ генерируются при магнитосферных бурях, хотя значительные могут наблюдаться и в отсутствие сильной (согласно Dst -индексу) магнитосферной активности. В [Weigel et al., 2003] отдельно рассмотрены разные параметры солнечного ветра для оценки того, насколько они влияют на вариации геомагнитного поля и его производной по времени. Авторы пришли к выводу, что процесс, ответственный за вариации X -компоненты, отличается от того, который определяет величину dX/dt .

На сегодняшний день уровень прогнозирования КП на разных временных и пространственных масштабах еще далек от удовлетворительного, но будущие наземные и космические наблюдения с высоким разрешением могут расширить фундаментальные представления, лежащие в основе моделирования и прогнозирования. Прогностические модели, основанные на теории хаоса и нелинейной динамике, качественно верно воспроизводят наблюдаемые особенности солнечно-земных связей, а модели, основанные на статистике и искусственных нейронных сетях, оказываются эффективнее для оперативного прогноза [Messerotti et al., 2009].

11.1. Компьютерные модели оперативного прогноза рисков ГИТ

Для технологических систем одним из практических шагов по уменьшению ущерба от КП, предпринимаемых международным геофизическим сообществом, является разработка численных моделей, способных осуществлять прогнозирование возможных электромагнитных возмущений в оперативном режиме [Veeramany et al., 2016]. Перспективным методом, позволяющим получить такой прогноз, является комбинирование глобальных моделей КП и симуляций приповерхностных электромагнитных полей [Pulkkinen et al., 2007, 2010; Zhang et al., 2012; Ngwira et al., 2013a, b, 2014; Püthe, Kuvshinov, 2013]. На основе такого моделирования может быть сделан прогноз ГИТ в технологических системах, так как эти токи могут быть вычислены при наличии данных о теллурическом электрическом поле, а также параметров и геометрии технологической сети [Zheng et al., 2013; Love, Swidinsky, 2014].

Модели КП основаны на физических принципах взаимодействия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитосферой Земли [Tsaouri et al., 2013]. Основными входными параметрами этих моделей являются спутниковые данные о солнечном ветре и ММП, а также данные о по-

токе солнечного радиоизлучения $F10.7$, передаваемые в режиме реального времени со спутников в точке Лагранжа L1 на линии Земля—Солнце (на удалении $\sim 200R_E$). Значительные средства и усилия направляются на разработку численных моделей, которые могли бы в оперативном режиме давать прогноз возможных геомагнитных возмущений. Важным, но пока неразрешенным, аспектом проблемы остается количественная нормировка моделей, поскольку чисто качественный прогноз с недостоверными погрешностями и без географической привязки мог бы приводить к неоправданным и сильно затратным защитным мерам. Под эгидой NOAA's Space Weather Prediction Center (SWPC), проводится сравнительный анализ и тестирование разрабатываемых моделей. При этом особое внимание уделяется возможностям моделей адекватно предсказывать быстрые флуктуации магнитного поля, которые являются основным индикатором появления опасных уровней ГИТ. Хотя, естественно, много дополнительных факторов, таких как проводимость Земли, конфигурация системы, тип высоковольтного трансформатора, также существенны для величины ГИТ в конкретной системе. Возможность использования в качестве входных данных параметров солнечного ветра и ММП дает потенциальную возможность предсказания dB/dt с заблаговременностью ~ 30 – 60 мин. Наиболее разработанными и широко используемыми являются следующие модели.

Статистическая модель [Weimer, 2013] дает значения векторного магнитного поля на поверхности Земли. Ее входными параметрами служат данные ММП, скорости солнечного ветра, угла наклона земного магнитного диполя и потока солнечного радиоизлучения $F10.7$. По усредненным за 25 мин значениям модель имеет горизонт предсказания 20 мин за счет времени распространения возмущения от спутника к фронту земной ударной волны. Коэффициенты сферического анализа для поля геомагнитных возмущений рассчитаны по данным наблюдений на спутнике ACE и на сети 120 наземных магнитометров.

Статистическая модель [Weigel et al., 2003] дает возможность предсказания $|dB/dt|$ с заблаговременностью 30 мин. Модель рассчитана по 1-минутным данным мировой сети магнитометров, а в качестве входной информации используется база данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Модель предсказывает ожидаемое на земной поверхности возмущение геомагнитного поля ΔB и dB/dt по данным шести часов предшествующих измерений межпланетных параметров. Успех прогноза существенно зависит от пространственного положения рассматриваемого региона и местного времени. В работе [Wintoft, 2005] показано, что десятиминутное значение среднеквадратичного $\log|dB/dt|$ в субавторальных точках можно прогнозировать с заблаговременностью 30 мин и линейным коэффициентом корреляции ~ 0.8 .

Для предсказания амплитуд магнитных возмущений и производной поля по данным о солнечном ветре и ММП разрабатываются модели, основанные на методе нейронных сетей [Weigel et al., 2003;

Lundstedt, 2005]. Существующие модели описывают не более 60 % вариаций для авроральной зоны. При этом оказывается, что амплитуда магнитного возмущения и производной поля не определяется одним и тем же процессом.

Достоинство эмпирических моделей заключается в том, что они не требуют мощных вычислительных ресурсов, поэтому могут быть легко включены в любые системы оперативного прогноза КП и риска для технологических систем. Более совершенные численные модели позволяют воспроизвести эволюцию возмущения КП от Солнца до Земли, но требуют мощных вычислительных ресурсов.

Space Weather Modeling Framework (SWMF) [<http://csem.engin.umich.edu/swmf>] представляет собой компьютерную систему моделирования плазменных процессов в ОКП [Tóth et al., 2005]. При моделировании все ОКП разделяется на несколько физических областей: глобальная магнитосфера (GM), внутренняя магнитосфера (IM), и ионосфера (IE). Часть GM построена по блочно-адаптивной схеме (BATS-R-US) и основана на релятивистских МГД-уравнениях. Расчетная область простирается от $32R_E$ вверх по потоку до $224R_E$ в хвост магнитосферы и до $2.5R_E$ от центра Земли. Область IM описывается моделью RCM (Rice Convection Model), которая рассчитывает усредненные по баунс-траекториям распределения электронов и ионов разных энергий. Область IE представлена моделью RIM (Ridley Ionosphere Model), которая использует продольные токи из GM-блока и параметр $F_{10.7}$ для расчета высыпания частиц и ионосферной проводимости. Модель SWMF также содержит блок, моделирующий динамику радиационного пояса Земли. Модель SWMF показала хорошие результаты в ходе сравнительного анализа разных моделей [Pulkkinen et al., 2013]. Было показано, что она достаточно точно воспроизводит геомагнитный индекс Dst . Воспроизведение вариаций магнитного поля в авроральных широтах является гораздо более амбициозной и пока неразрешенной задачей, так как требует точного воспроизведения мелкомасштабных ионосферных токовых структур.

Модель CMIT (Coupled Magnetosphere Ionosphere Thermosphere Model) [Wang et al., 2004] объединяет модель LFM (Lyon—Fedder—Mobarry) с моделью TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics Global Circulation Model). Блок LFM решает уравнения идеальной МГД, чтобы описать взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой. Глобальная модель OpenGGCM (Open General Geospace Circulation Model) рассчитывает взаимодействие солнечного ветра с системой магнитосфера—ионосфера—термосфера. Помимо численного решения МГД-уравнений с высоким пространственным разрешением в магнитосфере, модель также включает ионосферные процессы и их взаимосвязь с магнитосферой. Кинетические процессы, которые напрямую не описываются МГД-уравнениями, учтены в модели с помощью параметризованных эмпирических соотношений. Модель OpenGGCM использует в каче-

стве входных параметров данные по солнечному ветру, ММП и излучению Солнца $F_{10.7}$. На выходе модель выдает все магнитосферные и ионосферные величины, необходимые для оценки ГИТ.

На основе описанных выше методов глобального моделирования может быть получена картина ионосферных токов и вариаций магнитного поля у поверхности Земли. Эти результаты могут быть использованы в качестве входных параметров для последующего численного моделирования теллурических электрических полей с помощью современных 3D программных средств [Kuvshinov, 2008; Ivannikova et al., 2018; Marshalko et al., 2020], которые позволяют достигать значительно более высокой точности моделирования при работе с высококонтрастными моделями проводимости.

11.2. Прогностические модели интенсивности и положения аврорального овала

Наиболее активные проявления КП наблюдаются в области аврорального овала [Воробьев и др., 2018]. Для нее характерно наличие резких градиентов и высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует сбои и значительно снижает устойчивость глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Назрела необходимость создания и практической апробации моделей мониторинга и оперативного прогноза динамики аврорального овала при изменениях КП. Погодно-независимым источником детальной информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния. Модель аврорального овала OVATION-prime (OP) основана на данных более 20 лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках DMSP [Newell et al., 2014]. Данные регистрации потоков частиц на низкоорбитальных спутниках не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, доступны для обоих полушарий и более чувствительны, чем наземные или спутниковые оптические наблюдения. Модель OP параметризована на значения параметров солнечного ветра и ММП и рассчитывает ожидаемое 2D пространственное распределение интенсивности основных типов высыпаний авроральных электронов и ионов. Все типы высыпаний объединяются для составления карт суммарной мощности полярных сияний. В модели использована ранее установленная статистическая связь между параметрами межпланетной среды и динамикой аврорального овала. Эмпирическая модель OP позволяет рассчитать зависимость между интенсивностью авроральных высыпаний и вероятностью их наблюдения невооруженным глазом и реализована с помощью веб-сервиса NOAA [<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>], который предсказывает вероятность наблюдения полярных сияний на ближайшие 30 мин.

Уже существуют веб-сервисы, ориентированные на региональный мониторинг аврорального овала, разработанные Университетом Аляски [<https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast/>], Метеорологической службой Исландии [<https://en.vedur.is/>]

weather/forecasts/aurora], Университетским центром на Шпицбергене [<http://kho.unis.no>]. На основе модели ОР разработан веб-сервис для визуализации вероятности появления полярных сияний, построенный методами географических информационных систем [Воробьев и др., 2020б; Vorobev et al., 2020]. Входными параметрами модели являются данные в реальном времени по солнечному ветру и ММП с межпланетных спутников, поступающие на фронт сайт НАСА. Сдвиг по времени (~1 ч) за счет распространения солнечного ветра от межпланетного спутника к границе магнитосферы дает принципиальную возможность краткосрочного прогноза ожидаемой интенсивности и положения полярных сияний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К настоящему времени космическая геофизика достигла уровня, позволяющего ставить вопрос о реальном прогнозе КП. Задачей исследования КП, с одной стороны, является выявление связей между солнечной активностью и процессами, происходящими в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли, с другой — анализ влияния этих процессов на техногенные и биологические системы. Эта проблема становится все более актуальной, поскольку современные высокотехнологичные системы, особенно космические, весьма чувствительны к воздействию электромагнитных полей и радиации. Несмотря на мощный арсенал современной космической геофизики — солнечные телескопы, космические станции между Землей и Солнцем, сотни спутников на разных орбитах, сети наземных радаров и магнитометров и т. п. — проблема мониторинга и прогноза состояния ОКП не свелась к чисто инженерной, многие фундаментальные вопросы остаются нерешенными.

В отличие от ураганов и бурь, которые имеют региональный эффект и довольно успешно прогнозируются на 2–3 дня вперед, возмущения КП могут охватывать континенты и развиваться в считанные минуты после того, как вызывающие их возмущения обнаружены в солнечном ветре. Хотя визуальная регистрация солнечных вспышек и корональных выбросов масс доступна за несколько дней до появления геомагнитных возмущений, лишь небольшая часть солнечных выбросов представляет угрозу появления магнитных бурь и ГИТ. Какие именно события на Солнце приводят к появлению интенсивных ГИТ — остается нерешенной и активно исследуемой проблемой. Задача прогноза ГИТ не сводится к задаче прогноза магнитных бурь. Необходимая для оценки влияния геомагнитной активности на технологические системы в арктических и субарктических широтах модель должна описывать не только динамику крупномасштабной магнитосферно-ионосферной токовой системы, но и спорадически возникающие в ней быстропеременные локализованные продольные токи.

Располагая рассчитанной картиной теллурических полей, можно провести инженерный расчет ГИТ в заданной технологической системе с извест-

ной геометрией и структурой. Оценка возможных эффектов для каждой конкретной системы представляет собой отдельную задачу. Далее, располагая расчетами отклика потенциалов вдоль заданной ветки трубопровода или электрической сети на ГИТ, инженеры могут полностью представить поведение катодной защиты при магнитных бурях и выявить слабые элементы сети. Оперативный прогноз возможных критических уровней ГИТ может быть использован операторами для снижения риска катастрофических последствий (уменьшение нагрузки, подключение емкостной защиты, и т. п.). Информация о ГИТ важна не только с практической точки зрения, но и с общенаучной точки зрения, поскольку ГИТ являются важным элементом воздействия солнечной активности на систему магнитосфера — ионосфера.

Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений наблюдаются на авроральных широтах, поэтому в северных странах с 1970-х гг. начались исследования влияния ГИТ на наземные технологические системы и возможных мер для уменьшения негативных последствий. Даже страны, расположенные на низких широтах, обеспокоены возможным влиянием ГИТ на технологические системы. Особую угрозу эти факторы представляют для безопасной работы технологических систем в арктической зоне Российской Федерации, так как РФ располагает самыми протяженными нефтегазопроводами, линиями электропередач и транспортными магистралями [Сушко, Косых, 2013]. Расчет возможных уровней ГИТ при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сетей для принятия необходимых мер по снижению риска катастрофических последствий, является весьма актуальной задачей. Несмотря на исключительную важность таких исследований, российское академическое сообщество практически не занимается подобными задачами, а производственные компании РФ в настоящий момент не показывают заинтересованности в рачительном управлении технологическими системами. Уровень и размах отечественных исследований по этому направлению явно отстает от работ, проводимых в передовых странах. В отечественной нормативной документации влияние ГИТ на электроэнергетические системы и надежность работы электрооборудования до сих пор не учитывается, хотя задача учета потенциально опасных геомагнитных возмущений является актуальной именно для России из-за большой протяженности электрических сетей и трубопроводов на высоких широтах. Кроме того, в отличие от скандинавских стран и Канады, авроральные районы РФ не имеет достаточно плотной сети магнитных станций. Во многих случаях информация о ГИТ является собственностью коммерческих промышленных компаний и недоступна мировому научному сообществу для углубленного анализа.

Для уточнения закономерностей проявления воздействия геомагнитных возмущений на работу автоматики железных дорог и поиска путей ограничения воздействия представляется целесообразным продолжить исследование аномалий на участках

железнодорожных сетей, расположенных, в первую очередь, в арктической и субарктической зонах. Хотя зарегистрированные максимальные величины ГИТ в железнодорожных токопроводах (>1 А) не являются чрезвычайно высокими, напряженная работа скоростной дороги и высокие риски требуют внимательного отношения к воздействию геомагнитных возмущений.

Настоятельной стала необходимость создания отечественной модели, способной оценить параметры КП, критичные для технологических систем. Ключевые выходные параметры модели — статистические карты вариабельности магнитного поля и ГИТ при магнитных бурях и суббурях, параметризованные по различным наборам параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, и геомагнитных индексов. Статистические карты ГИТ являются входными параметрами для расчета наведенных токов в заданных технологических системах. С помощью синтетических моделей можно будет выявлять слабые элементы технологической сети по отношению к ГИТ, давать прогноз критических уровней ГИТ (за 0.5–1 ч), который может быть использован операторами для принятия необходимых мер по снижению риска катастрофических последствий. Необходимо также создание глобальной статистической модели переменного магнитного поля над ионосферой, электрических токов, текущих между магнитосферой и ионосферой вдоль силовых линий геомагнитного поля (продольных токов), численной модели электрических токов в ионосфере, модели распределения скорости изменения геомагнитного поля на поверхности Земли и соответствующих вариаций теллурического поля и в конечном счете — модели ГИТ. Предположительно, интенсивность ожидаемых ГИТ резко неоднородна в пространстве и не совпадает с областью максимальных магнитных возмущений. Важным элементом являются работы по компиляции атласа проводимости земной коры в высоких широтах по имеющимся результатам зондирования земной коры.

Помимо прямых угроз технологическим системам от возмущений КП, главным образом связанных с ГИТ, существуют и косвенные. К ним следует отнести снижение надежности и качества работы технической инфраструктуры, которая в настоящее время используется повсеместно. В первую очередь, под воздействием экстремальных факторов КП нарушается устойчивость радиосвязи [Бернгардт, 2017] и резко возрастает погрешность позиционирования пользователей глобальных навигационных спутниковых систем [Демьянов, Ясюкевич, 2021]. В конечном счете, необходимо создание российского программно-наблюдательного комплекса мониторинга и предсказания прямых и косвенных угроз КП, учитывающего опыт прогностических центров NOAA США [<https://www.swpc.noaa.gov>] и ESA [https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50240. Многие результаты, представленные в обзоре, получены совместно с Белаховским В.Б., Вахни-

ной В.В., Козыревой О.В., Сахаровым Я.А., Ягвой Н.В., которым автор искренне признателен за сотрудничество. Выражаю благодарность рецензентам за внимательный анализ работы и большое число конструктивных замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Каткалов Ю.В. и др. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтральных силовых автотрансформаторов. *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 1. С. 118–123.
- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы. *Физика Земли*. 2018. № 1. С. 173–185.
- Бернгардт О.И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 40–60. DOI: [10.12737/szf-33201705](https://doi.org/10.12737/szf-33201705).
- Вахнина В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях. Тольятти: Издательство ТГУ, 2012. 103 с.
- Вахнина В.В., Кретов Д.А. Математическая модель силового трансформатора при воздействии геомагнитных бурь на системы электроснабжения. Вектор Науки Тольяттинского государственного университета. 2012а. № 4. С. 141–144.
- Вахнина В.В., Кретов Д.А. Определение допустимых уровней геоиндуцированных токов для обеспечения работоспособности силовых трансформаторов при геомагнитных бурях. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2012б. № 4. С. 1–7.
- Вахнина В.В., Кузнецов В.А. Разработка системы мониторинга геоиндуцированных токов в нейтральных силовых трансформаторов при геомагнитных бурях. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 2. С. 108–111.
- Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов. Вектор Науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 65–69.
- Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Шаповалов В.А. и др. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети. М.: Инфра-инженерия, 2018. 256 с.
- Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И. и др. Геоиндуцированные токи и их связь с положением западной электроструи и границами авроральных высыпаний. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 5, Вып. 4. С. 16–28. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28).
- Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального 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).
- Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Еникеев Т.А., Воробьева Г.Р. Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций. *Компьютерная оптика*. 2020а. Т. 44, № 5. С. 782–790. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-707](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-707).
- Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Решетников А.Г. и др. Веб-ориентированная визуализация геофизических параметров в области аврорального овала. *Научная визуализация*. 2020б. Т. 12, № 3. С. 108–118. DOI: [10.26583/sv.12.3.10](https://doi.org/10.26583/sv.12.3.10).

Гуревич В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. *Компоненты и технологии*. 2010. № 2. С. 46–51.

Гуревич В.И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения. М.: Инфра-инженерия, 2014. 256 с.

Гусев Ю.П., Лхамдондог А., Монаков Ю.В. и др. Оценка воздействия геоиндуцированных токов на пусковые режимы силовых трансформаторов. *Электрические станции*. 2020. № 2. С. 54–59.

Демьянов В.В., Яськоевич Ю.В., Космическая погода: Факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 30–52. DOI: [10.12737/szf-72202104](https://doi.org/10.12737/szf-72202104).

Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова. *Новости электротехники*. 2013. № 2. С. 80.

Ивонин А.А. Влияние геомагнитного поля Земли на защиту от коррозии МГ ООО «Газпром Трансгаз Ухта». *Коррозия Территории Нефтегаз*. 2015. № 1. С. 88–89.

Карташев И.И., Динь-Дык Н. Влияние характеристик намагничивания трансформатора на спектр генерируемых им высших гармоник. *Вестник МЭИ*. 2007. С. 56–63.

Касинский В.В., Птицына Н.Г., Ляхов Н.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47, № 5. С. 714–718.

Кобелев А.В., Зыбин А.А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения. *Вестник ТГТУ*. 2011. Т. 17, № 1. С. 181–191.

Муллаярв В.А., Козлов В.И., Григорьев Ю.М., Ромащенко Ю.А. Индуцированный в газопроводе ток от большого магнитного возмущения 21.01.05. *Наука и образование*. 2006. № 1. С. 53–55.

Панюшкин Г.Н. Кинетика геомагнитного влияния на подземную коррозию магистральных трубопроводов. *Трубопроводный транспорт*. 2014. № 3-4. С. 34–35.

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.

Сахаров Я.А., Кудряшова Н.В., Данилин А.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики. *Вестник МИИТ*. 2009. Вып. 21. С. 107–111.

Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Билин В.А., Николаев В.Г. Экстремальные величины геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме. «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XLII Annual Seminar, Apatity. 2019. С. 5–56. DOI: [10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.53-56](https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.53-56).

Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи. Изв. РАН, серия физическая. 2021. Т. 85, № 3. С. 445–450. DOI: [10.31857/s0367676521030236](https://doi.org/10.31857/s0367676521030236).

Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Данилин А.Н. и др. Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтральных автотрансформаторов. *Труды КНЦ РАН: Энергетика*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012. Вып. 4. С. 60–68.

Селиванов В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б. Результаты длительных регистраций токов в нейтральных силовых трансформаторов. *Труды КНЦ РАН: Энергетика*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. Вып. 1. С. 84–90.

Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Билин В.А. и др. Исследование гармонического состава тока в нейтрали

трансформатора в периоды геомагнитных возмущений. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. № 1-14 (8). С. 43–52.

Сивоконь В.П., Сероветников А.С. Геомагнитно-индуцированные токи в электрической сети Камчатки. *Электро*. 2013. С. 19–22.

Сивоконь В.П., Сероветников А.С. Вариации спектра тока трансформатора, подверженного воздействию геомагнитно-индуцированных токов. *Электро*. 2015. № 1. С. 18–21.

Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов. *Электро*. 2011. С. 44–51.

Сушко В.А., Косых Д.А. Геомагнитные штормы. Угроза национальной безопасности России. *Новости электротехники*. 2013. № 4. С. 25–28.

Трищенко Л.Д. Геомагнитные возмущения и системы электроснабжения и проводной связи. *Плазменная гелиофизика*. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 213–219.

Успенский М.И. Основные понятия и пути влияния геомагнитных штормов на электроэнергетическую систему. *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2017. № 1. С. 72–81.

Чинкин В.Е., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 5. С. 588–599. DOI: [10.31857/S001679402005003X](https://doi.org/10.31857/S001679402005003X).

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.

Albertson V.D. Geomagnetic disturbance effects on power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1992. Vol. 8, iss. 3. P. 1206–1216. DOI: [10.1109/61.252646](https://doi.org/10.1109/61.252646).

Anderson C.W., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Outage of the L-4 system and the geomagnetic disturbances of August 4, 1972. *Bell System Technical J.* 1974. Vol. 53, iss. 9. P. 1917–1837.

Apatenkov S.V., Sergeev V.A., Pirjola R., Viljanen A. Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 63–72.

Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I., et al. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, iss. 6. e2019GL086677. DOI: [10.1029/2019GL086677](https://doi.org/10.1029/2019GL086677).

Bedrosian P.A., Love J.J. Mapping geoelectric fields during magnetic storms: Synthetic analysis of empirical United States impedances. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, no. 23. P. 10,160–10,170. DOI: [10.1002/2015GL066636](https://doi.org/10.1002/2015GL066636).

Beggan C.D. Sensitivity of geomagnetically induced currents to varying auroral electrojet and conductivity models. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, no. 24. DOI: [10.1186/s40623-014-0168-9](https://doi.org/10.1186/s40623-014-0168-9).

Beggan C.D., Beamish D., Richards A., et al. Prediction of extreme geomagnetically induced currents in the UK high-voltage network. *Space Weather*. 2013. Vol. 11, iss. 7. P. 407–419. DOI: [10.1002/swe.20065](https://doi.org/10.1002/swe.20065).

Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A., Lorentzen D.A. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69, no.1. DOI: [10.1186/s40623-017-0696-1](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0696-1).

Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *J. Space Weather and Space Climate*. 2019. Vol. 9, no. A18. DOI: [10.1051/swsc/2019015](https://doi.org/10.1051/swsc/2019015).

Béland J., Small K. Space weather effects on power transmission systems: the cases of Hydro-Québec and Transpower New Zealand Ltd. *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 2005. Vol. 176. P. 287–299.

- Belov A.V., Gaidash S.P., Kanonidi K.D., et al. Operative center of the geophysical prognosis in Izmiran. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23, iss. 9. P. 3163–3170. DOI: [10.5194/angeo-23-3163-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-3163-2005).
- Bernabeu E.E. Modeling geomagnetically induced currents in the Dominion Virginia Power using extreme 100 year geoelectric field scenarios, Pt 1. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2013. Vol. 28, iss. 1. P. 516–523.
- Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2002. Vol. 64, iss. 16. P. 1793–1802. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00128-1).
- Bolduc L., Langlois P., Boteler D., Pirjola R. A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec. 1. General results. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1998. Vol. 13, iss. 4. P. 1251–1256. DOI: [10.1109/61.714492](https://doi.org/10.1109/61.714492).
- Bolduc L., Langlois P., Boteler D., Pirjola R. A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec, 2. Detailed analysis of a large event. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2000. Vol. 15, iss. 1. P. 272–278.
- Bonner L.R., Schultz A. Rapid predictions of electric fields associated with geomagnetically induced currents in the presence of three-dimensional ground structure: Projection of remote magnetic observatory data through magnetotelluric impedance tensors. *Space Weather.* 2017. Vol. 15. P. 204–227. DOI: [10.1002/2016SW001535](https://doi.org/10.1002/2016SW001535).
- Boteler D.H. Distributed-source transmission line theory for electromagnetic induction studies. *Proc. the 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility.* Zürich, Switzerland, 1997. P. 401–408.
- Boteler D.H. Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada. *Natural Hazard.* 2001. Vol. 23, no. 2-3. P. 101–120.
- Boteler D.H. A new versatile method for modelling geomagnetic induction in pipelines. *Geophysical Journal International.* 2013. Vol. 193. P. 98–109.
- Boteler D.J., Cookson V.J. Telluric currents and their effects on pipelines in the Cook Strait region of New Zealand. *Materials Performance.* 1986. Vol. 25, no. 3. P. 27–32.
- Boteler D.H., Pirjola R.J. The complex image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the Earth by the auroral electrojet. *Geophysical J. International.* 1998. Vol. 132. P. 31–40.
- Boteler D.H., Jansen van Beek G. August 4, 1972 revisited: A new look at the geomagnetic disturbance that caused the L4 cable system outage. *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26, no. 5. P. 577–580.
- Boteler D.H., Trichtchenko L. Telluric influence on pipelines. *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook.* 2015. P. 275–285.
- Boteler D.H., Pirjola R.J. Modeling geomagnetically induced currents. *Space Weather.* 2017. Vol. 15. P. 258–276. DOI: [10.1002/2016SW001499](https://doi.org/10.1002/2016SW001499).
- Boteler D.H., Pirjola R.J. Numerical calculation of geoelectric fields that affect critical infrastructure. *International Journal of Geosciences.* 2019. Vol. 10. P. 930–949.
- Boteler D.H., Shier R.M., Watanabe T., Horita R.E. Effects of geomagnetically induced currents in the BC Hydro 500 kV system. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1989. Vol. 4, no. 1. P. 818–823.
- Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevalinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Adv. Space. Res.* 1998. Vol. 22. P. 17–27.
- Boteler D.H., Pirjola R., Trichtchenko L. On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's surface by a "wide" electrojet. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 14. P. 1311–1315.
- Bozoki B. The effects of GIC on protective relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1996. Vol. 11. P. 725–739.
- Brasse H., Junge A. The influence of geomagnetic variations on pipelines and an application for large-scale magnetotelluric depth sounding. *J. Geophys.* 1984. Vol. 55, no. 1. P. 31–36.
- Campbell W.H. Induction of auroral zone electric currents within Alaska pipeline. *Pure and Applied Geophysics.* 1978. Vol. 116. P. 1143–1173.
- Campbell W.H. Observation of electric currents in the Alaska oil pipeline resulting from auroral electrojet current sources. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 1980. Vol. 61. P. 437–449.
- Campbell W.H., Zimmerman J.E. Induced Electric Currents in the Alaska Oil Pipeline Measured by Gradient Fluxgate and SQUID Magnetometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1980. Vol. GE-18, no. 3. P. 244–250. DOI: [10.1109/TGRS.1980.4307498](https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.4307498).
- Carter B.A., Yizengaw E., Pradipta R., et al. Interplanetary shocks and the resulting geomagnetically induced currents at the equator. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, iss. 16. P. 6554–6559. DOI: [10.1002/2015GL065060](https://doi.org/10.1002/2015GL065060).
- Chinkin V.E., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., et al. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 212, 105514. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105514](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514).
- Cid C., Saiz E., Guerrero A., et al. A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century. *J. Space Weather and Space Climate.* 2015. Vol. 5, no. A16. DOI: [10.1051/Swsc/2015017](https://doi.org/10.1051/Swsc/2015017).
- Ciliverd M.A., Rodger C.J., Brundell J.B., et al. Long-lasting geomagnetically induced currents and harmonic distortion observed in New Zealand during the 7–8 September 2017 disturbed period. *Space Weather.* 2018. Vol. 16, iss. 6. P. 704–717. DOI: [10.1029/2018SW001822](https://doi.org/10.1029/2018SW001822).
- Coles R.L., Lam H.-L. Geomagnetic forecasting in Canada: A review. *Physics in Canada.* 1998. Vol. 54. P. 327–331.
- Dimmock A.P., Rosenqvist L., Hall J.O., et al. The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm. *Space Weather.* 2019. Vol. 17, iss. 7. P. 989–1010. DOI: [10.1029/2018SW002132](https://doi.org/10.1029/2018SW002132).
- Divett T., Ingham M., Beggan C.D., et al. Modeling geoelectric fields and geomagnetically induced currents around New Zealand to explore GIC in the South Island's electrical transmission network. *Space Weather.* 2017. Vol. 15, iss. 10. P. 1396–1412. DOI: [10.1002/2017SW001697](https://doi.org/10.1002/2017SW001697).
- Divett T., Richardson G.S., Beggan C.D., et al. Transformer level modeling of geomagnetically induced currents in New Zealand's South Island. *Space Weather.* 2018. Vol. 16, iss. 6. P. 718–735. DOI: [10.1029/2018SW001814](https://doi.org/10.1029/2018SW001814).
- Doumbia V., Boka K., Kouassi N., et al. Induction effects of geomagnetic disturbances in the geoelectric field variations at low latitudes. *Ann. Geophys.* 2017. Vol. 35, iss. 1. P. 39–51. DOI: [10.5194/angeo-35-39-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-39-2017).
- Eastwood J.P., Biffis E., Hapgood M.A., et al. The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand? *Risk Analysis.* 2017. Vol. 37, iss. 2. P. 206–218. DOI: [10.1111/risa.12765](https://doi.org/10.1111/risa.12765).
- Engebretson M.J., Steinmetz E.S., Posch J.L., et al. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 2. Multiple-instrument observations. *J. Geophys. Res.* 2019. Vol. 124, no. 9. P. 7459–7476. DOI: [10.1029/2019JA026797](https://doi.org/10.1029/2019JA026797).
- Erinmez I.A., Kappenman J.G., Radasky W.A. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 743–756.
- Eroshenko E.A., Belov A.V., Boteler D., et al. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 46, iss. 9. P. 1102–1110. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).
- Extreme Space Weather: Impacts on Engineered Systems and Infrastructure.* London: Royal Academy of Engineering, 2013. 70 p.
- Fernberg P.A., Samson C., Boteler D.H., et al. Earth conductivity structures and their effects on geomagnetic induction

- in pipelines. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25, iss. 1. P. 207–218. DOI: [10.5194/angeo-25-207-2007](https://doi.org/10.5194/angeo-25-207-2007).
- 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, P. 76–91. DOI: [10.1002/2013SW000967](https://doi.org/10.1002/2013SW000967).
- Forbes K.F. Space weather and the electricity market. *Space Weather.* 2004. Vol. 2, iss. 10, S10003.
- Forbes K.F., St. Cyr O.C. Solar activity and economic fundamentals: Evidence from 12 geographically disparate power grids. *Space Weather.* 2008. Vol. 6, iss. 10, S10003. DOI: [10.1029/2007SW000350](https://doi.org/10.1029/2007SW000350).
- Gaunt C.T. Why space weather is relevant to electrical power systems. *Space Weather.* 2016. Vol. 14, iss. 1. P. 2–9. DOI: [10.1002/2015SW001306](https://doi.org/10.1002/2015SW001306).
- Gaunt C.T., Coetzee G. Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks. *IEEE Power Tech.* 2007, Conference Paper 445, Lausanne, July, P. 807–812.
- Girgis R., Vedante K. Impact of GICs on Power Transformers: Overheating is not the real issue. *Electrification Magazine, IEEE.* 2015. Vol. 3. P. 8–12. DOI: [10.1109/MELE.2015.2480355](https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2480355).
- Gleisner H., Lundstedt H. A neural network-based local model for prediction of geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 8425–8434.
- Guillon S., Toner P., Gibson L., Boteler D.A. Colorful blackout: the havoc caused by auroral electrojet generated magnetic field variations in 1989. *IEEE Power and Energy.* 2016. P. 59–71. DOI: [10.1109/MPE.2016.2591760](https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2591760).
- Gummow R., Eng P. GIC effects on pipeline corrosion and corrosion control systems. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64, iss. 16. P. 1755–1764. DOI: [10.1016/s1364-6826\(02\)00125-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00125-6).
- Hakkinen L., Pirjola R. Calculation of electric and magnetic fields due to an electrojet current system above a layered Earth. *Geophysica.* 1986. Vol. 22. P. 31–44.
- Hapgood M.A. Toward a scientific understanding of the risk from extreme space weather. *Adv. Space Res.* 2011. Vol. 47. P. 2059–2072.
- Hapgood M. Prepare for the coming space weather storm. *Nature.* 2012. Vol. 484. P. 311–313.
- Hapgood M. The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event. *Space Weather.* 2019. Vol. 17. P. 950–975. DOI: [10.1029/2019SW002195](https://doi.org/10.1029/2019SW002195).
- Hejda P., Bochnicek J. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 3089–3093.
- Henriksen J.F., Elvik R., Gransen L. Telluric currents corrosion on buried pipelines. *Proc. the 8th Scandinavian Corrosion Congress.* Helsinki, Finland, 1978. Vol. 2. P. 167–176.
- Huttunen K.E., Kilpua S.P., Pulkkinen A., et al. Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23. *Space Weather.* 2008. Vol. 6, iss. 10, S10002. DOI: [10.1029/2007SW000374](https://doi.org/10.1029/2007SW000374).
- Ingham M., Rodger C.J. Telluric field variations as drivers of variations in cathodic protection potential on a natural gas pipeline in New Zealand. *Space Weather.* 2018. Vol. 16. P. 1396–1409. DOI: [10.1029/2018SW001985](https://doi.org/10.1029/2018SW001985).
- Ingham M., Rodger C.J., Divett T., et al. Assessment of GIC based on transfer function analysis. *Space Weather.* 2017. Vol. 15, iss. 12. P. 1615–1627. DOI: [10.1002/2017SW001707](https://doi.org/10.1002/2017SW001707).
- Ivannikova E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., et al. Regional 3D modeling of ground electromagnetic field due to realistic geomagnetic disturbances. *Space Weather.* 2018. Vol. 16, iss. 5. P. 476–500. DOI: [10.1002/2017SW001793](https://doi.org/10.1002/2017SW001793).
- Jonas S., McCarron E.D. Recent U.S. policy developments addressing the effects of geomagnetically induced currents. *Space Weather.* 2015. Vol. 13, iss. 11. P. 730–733. DOI: [10.1002/2015SW001310](https://doi.org/10.1002/2015SW001310).
- Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impact on power systems. *IEEE Power Engineering Review.* 1996. P. 5–8.
- Kappenman J.G. Systemic failure on a grand scale: The 14 August 2003 North American blackout. *Space Weather.* 2003. Vol. 1, iss. 2. DOI: [10.1029/2003SW000027](https://doi.org/10.1029/2003SW000027).
- 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. 8, S08C01. DOI: [10.1029/2004SW000128](https://doi.org/10.1029/2004SW000128).
- Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impact on the US power grid. *Meta-R-319 Report*, 2010.
- Kappenman J.G., Albertson V.D., Mohan N. Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically induced currents. *IEEE Transactions on Power Systems.* 1981. Vol. PAS-100, iss. 3. P. 1078–1088.
- Kataoka R., Pulkkinen A. Geomagnetically induced currents during intense storms driven by coronal mass ejections and corotating regions. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. A3, A03S12. DOI: [10.1029/2007JA012487](https://doi.org/10.1029/2007JA012487).
- Kelbert A., Balch C.C., Pulkkinen A., et al. Methodology for time domain estimation of storm time geoelectric fields using the 3D magnetotelluric response tensors. *Space Weather.* 2017. Vol. 15, iss. 7. P. 874–894. DOI: [10.1002/2017SW001594](https://doi.org/10.1002/2017SW001594).
- Kelly G.S., Viljanen A., Beggan C.D., Thomson A.W.P. Understanding GIC in the UK and French high-voltage transmission systems during severe magnetic storms. *Space Weather.* 2017. Vol. 15. P. 99–114. DOI: [10.1002/2016SW001469](https://doi.org/10.1002/2016SW001469).
- Khanal K., Adhikari B., Chapagain N.P., Bhattarai B. HILDCAA-related GIC and possible corrosion hazard in underground pipelines: A comparison based on wavelet transform. *Space Weather.* 2019. Vol. 17, iss. 2. P. 238–251. DOI: [10.1029/2018SW001879](https://doi.org/10.1029/2018SW001879).
- Knipp D.J. Synthesis of Geomagnetically Induced Currents: Commentary and Research. *Space Weather.* 2015. Vol. 13, iss. 11. P. 727–729. DOI: [10.1002/2015SW001317](https://doi.org/10.1002/2015SW001317).
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A. Crustal conductivity in Fennoscandia - a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth, Planets and Space.* 2002. Vol. 54. P. 535–558. DOI: [10.1186/BF03353044](https://doi.org/10.1186/BF03353044).
- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Belakhovsky V.V., Sakharov Ya.A. Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015, storm. *Earth, Planetary and Space.* 2018. Vol. 70, no. 157. DOI: [10.1186/s40623-018-0933-2](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0933-2).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., Epishkin D. Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents. *Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences “Problems of Geocosmos-2018”.* Springer Nature Switzerland, 2019. P. 297–307. DOI: [10.1007/978-3-030-21788-4_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_26).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., Baddeley L.J. Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents. *Ann. Geophys.* 2020. Vol. 63, no. 2. GM219. DOI: [10.4401/ag-8198](https://doi.org/10.4401/ag-8198).
- Krausmann E., Andersson E., Russell T., Murtagh W. Space Weather and Rail: Findings and Outlook. *Joint Research Centre Report. JRC98155.* Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2015. DOI: [10.2788/211456](https://doi.org/10.2788/211456).
- Kuvshinov A. 3-D global induction in the oceans and solid Earth: Recent progress in modeling magnetic and electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric, and oceanic origin. *Survey in Geophysics.* 2008. Vol. 29, iss. 2. P. 139–186. DOI: [10.1007/s10712-008-9045-z](https://doi.org/10.1007/s10712-008-9045-z).
- Kuvshinov A., Olsen N. A global model of mantle conductivity derived from 5 years of CHAMP, Orsted, and SAC-C magnetic data. *Geophys. Res. Lett.* 2006. vol. 331, iss. 18, L1830. DOI: [10.1029/2006GL027083](https://doi.org/10.1029/2006GL027083).
- Langlois P., Bolduc L., Chouteau M.C. Probability of occurrence of geomagnetic storms based on a study of the distri-

- bution of the electric field amplitudes measured in Abitibi, Québec, in 1993–1994. *J. Geomagnetism and Geoelectricity*. 1996. Vol. 48. P. 1033–1041.
- Lanzerotti L.J. Geomagnetic influences on man-made systems. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1979. Vol. 41. P. 787–796.
- Lanzerotti L.J. Geomagnetic induction effects in ground-based systems. *Space Sci. Rev.* 1983. Vol. 34. P. 347–356. DOI: [10.1007/BF00175289](https://doi.org/10.1007/BF00175289).
- Lanzerotti L.J. Space weather effects on technologies. *Space Weather*. 2001. Vol. 125, iss. 11. DOI: [10.1029/GM125p0011](https://doi.org/10.1029/GM125p0011).
- Lanzerotti L.J., Medford L.V., MacLennan C.G., Thomson D.J. Studies of large-scale Earth potential across oceanic distances. *ATT Technical J.* 1995. P. 73–84.
- Lehtinen M., Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically induced electric fields. *Ann. Geophys.* 1985. Vol. 3. P. 479–484.
- Liu C.-M., Liu L.-G., Pirjola R., Wang Z.-Z. Calculation of geomagnetically induced currents in mid-to low-latitude power grids based on the plane wave method: A preliminary case study. *Space Weather*. 2009. Vol. 7, iss. 4. S04005. DOI: [10.1029/2008SW000439](https://doi.org/10.1029/2008SW000439).
- Liu L., Ge X., Zong W., et al. Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway. *Space Weather*. 2016. Vol. 14, iss. 10. P. 754–763. DOI: [10.1002/2016SW001411](https://doi.org/10.1002/2016SW001411).
- Lotz S.I., Danskin D.W. Extreme value analysis of induced geoelectric field in South Africa. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 10. P. 1347–1356.
- Love J.J. Magnetic monitoring of Earth and space. *Phys. Today*. 2008. Vol. 61, iss. 2. P. 31–37. DOI: [10.1063/1.2883907](https://doi.org/10.1063/1.2883907).
- Love J.J. Credible occurrence probabilities for extreme geophysical events: Earthquakes, volcanic eruptions, magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, iss. 10. L10301. DOI: [10.1029/2012GL051431](https://doi.org/10.1029/2012GL051431).
- Love J.J., Swidinsky A. Time causal operational estimation of electric fields induced in the Earth's lithosphere during magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 2266–2274. DOI: [10.1002/2014GL059568](https://doi.org/10.1002/2014GL059568).
- Love J.J., Cosson P., Pulkkinen A. Global statistical maps of extreme-event magnetic observatory 1 min first differences in horizontal intensity. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, iss. 9. P. 4126–4135. DOI: [10.1002/2016GL068664](https://doi.org/10.1002/2016GL068664).
- Love J.J., Bedrosian P.A., Schultz A. Down to Earth with an electric hazard from space. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 5. P. 658–662.
- Love J.J., Lucas G.M., Kelbert A., Bedrosian P.A. Geoelectric hazard maps for the mid-Atlantic United States: 100 year extreme values and the 1989 magnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 44. DOI: [10.1002/2017GL076042](https://doi.org/10.1002/2017GL076042).
- Love J.J., Hayakawa H., Cliver E.W. Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921. *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 1281–1292. DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).
- Lucas G.M., Love J.J., Kelbert A. Calculation of voltages in electric power transmission lines during historic geomagnetic storms: an investigation using realistic Earth impedances. *Space Weather*. 2018. Vol. 16, iss. 2. P. 185–195. DOI: [10.1002/2017SW001779](https://doi.org/10.1002/2017SW001779).
- Lundstedt H. Solar caused potential in gas-pipelines in southern Sweden. *Proc. Solar-Terrestrial Predictions Workshop (STPW-IV)*, Ottawa, Canada, 1992. Vol. I. P. 233–237.
- Lundstedt H. Progress in space weather predictions and applications. *Adv. Space Res.* 2005. Vol. 36. P. 2516–2523.
- Lundstedt H. The sun, space weather and GIC effects in Sweden. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 37. P. 1182–1191. DOI: [10.1016/j.asr.2005.10.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.023).
- Mäkinen T. *Geomagnetically Induced Currents in the Finnish Power Transmission System*. Finnish Meteorological Institute, Geophys. Publ., Helsinki, Finland, 1993. N 32. 101 p.
- Marin J., Pilipenko V., Kozyreva O., et al. Global Pc5 pulsations during strong magnetic storms: excitation mechanisms and equatorward expansion. *Ann. Geophys.* 2014. Vol. 32, iss. 4. P. 319–331. DOI: [10.5194/angeo-32-319-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-319-2014).
- Marshalko E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., et al. Exploring the influence of lateral conductivity contrasts on the storm time behavior of the ground electric field in the eastern United States. *Space Weather*. 2020. Vol. 18, iss. 3. e2019SW002216. DOI: [10.1029/2019SW002216](https://doi.org/10.1029/2019SW002216).
- Marshall R.A., Waters C.L., Sciffer M.D. Spectral analysis of pipe-to-soil potentials with variations of the Earth's magnetic field in the Australian region. *Space Weather*. 2010. Vol. 8, iss.5. S05002. DOI: [10.1029/2009SW000553](https://doi.org/10.1029/2009SW000553).
- Marshall R.A., Dalzell M., Waters C.L., et al. Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, iss. 8. S08003. DOI: [10.1029/2012SW000806](https://doi.org/10.1029/2012SW000806).
- Marshall R.A., Kelly A., Van der Walt T., et al. Modelling geomagnetic induced currents in Australian power networks. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 7. P. 895–916. DOI: [10.1002/2017SW001613](https://doi.org/10.1002/2017SW001613).
- Marti L., Rezaei-Zare A., Narang A. Simulation of transformer hotspot heating due to geomagnetically induced currents. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 2013. Vol. 28, iss. 1. P. 320–327.
- Marti L., Yiu C. Real-Time Management of Geomagnetic Disturbances: Hydro One's eXtreme Space Weather control room tools. *IEEE Electrification Magazine*. 2015. Vol. 3, no. 4. P. 46–51. DOI: [10.1109/MELE.2015.2480637](https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2480637).
- Martin B.A. Telluric effects on a buried pipeline. *Corrosion*. 1993. Vol. 49, iss. 4. P. 343–350.
- McKay A.J., Whaler K.A. The electric field in northern England and southern Scotland: Implications for geomagnetically induced currents. *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 167. P. 613–625.
- Medford L.V., Meloni A., Lanzerotti L.J., Gregori G.P. Geomagnetic induction on a transatlantic communication cable. *Nature*. 1981. Vol. 290. P. 392–393.
- Meloni A., Lanzerotti L.J., Gregori G.P. Induction of currents in long submarine cables by natural phenomena. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1983. Vol. 21. P. 795–803.
- Messerotti M., Zuccarello F., Guglielmino S., et al. Solar weather modelling and predicting. *Space Sci. Rev.* 2009. Vol. 147. P. 121–185. DOI: [10.1007/s11214-009-9574-x](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9574-x).
- Molinski T.S. Why utilities respect geomagnetically induced currents. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 1765–1778.
- Myllys M., Viljanen A., Rui Ø.A., Ohnstad T.M. Geomagnetically induced currents in Norway: the northernmost high-voltage power grid in the world. *J. Space Weather Space Climate*. 2014. Vol. 4, no. A10. DOI: [10.1051/swsc/2014007](https://doi.org/10.1051/swsc/2014007).
- National Research Council. 2008. Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: [10.17226/12507](https://doi.org/10.17226/12507).
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels, *Space Weather*. 2014. Vol. 12, P. 368–379. DOI: [10.1002/2014sw001056](https://doi.org/10.1002/2014sw001056).
- Ngwira C.M., Pulkkinen A., McKinnell L.-A., Cilliers P.J. Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, iss. 11. S1100. DOI: [10.1029/2008SW000408](https://doi.org/10.1029/2008SW000408).
- Ngwira C.M., Pulkkinen A., Wilder F.D., Crowley G. Extended study of extreme geoelectric field event scenarios for geomagnetically induced current applications. *Space Weather*. 2013a. Vol. 11. P. 121–131. DOI: [10.1002/swe.20021](https://doi.org/10.1002/swe.20021).
- Ngwira C.M., Pulkkinen A., Mays Leila M., et al. Simulation of the 23 July 2012 extreme space weather event: What if this extremely rare CME was Earth directed? *Space Weather*. 2013b. Vol. 11, iss. 12. P. 671–679. DOI: [10.1002/2013SW000990](https://doi.org/10.1002/2013SW000990).
- Ngwira C.M., Pulkkinen A., Kuznetsova M.M., Glocer A. Modeling extreme “Carrington-type” space weather events

using three-dimensional MHD code simulations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 4456–4474. DOI: [10.1002/2013JA019661](https://doi.org/10.1002/2013JA019661).

Ngwira C.M., Pulkkinen A.A., Bernabeu E., et al. Characteristics of extreme geoelectric fields and their possible causes: Localized peak enhancements. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, iss. 17. P. 6916–6921. DOI: [10.1002/2015GL065061](https://doi.org/10.1002/2015GL065061).

Ngwira C.M., Sibeck D., Silveira M.D., et al. A study of intense local dB/dt variations during two geomagnetic storms. *Space Weather*. 2018. Vol. 16, iss. 6. P. 676–693. DOI: [10.1029/2018SW001911](https://doi.org/10.1029/2018SW001911).

Nikitina L., Trichtchenko L., Boteler D.H. Assessment of extreme values in geomagnetic and geoelectric field variations for Canada. *Space Weather*. 2016. Vol. 14. P. 481–494. DOI: [10.1002/2016SW001386](https://doi.org/10.1002/2016SW001386).

Oliveira D.M., Ngwira C.M. Geomagnetically Induced Currents: Principles. *Brazilian J. Phys.* 2017. Vol. 47, no. 5. P. 552–560. DOI: [10.1007/s13538-017-0523-y](https://doi.org/10.1007/s13538-017-0523-y).

Oughton E.J., Skelton A., Horne R.B., et al. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 65–83. DOI: [10.1002/2016SW001491](https://doi.org/10.1002/2016SW001491).

Overbye T.J., Shetye K.S., Hutchins T.R., et al. Power grid sensitivity analysis of geomagnetically induced currents. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. Vol. 28. P. 4821–4828. DOI: [10.1109/TPWRS.2013.2274624](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2274624).

Piccinelli R., Krausmann E. *Space Weather and Power Grids — A Vulnerability assessment*. Report to European Union, Luxembourg, 2014. 53 p. DOI: [10.2788/20848](https://doi.org/10.2788/20848).

Pilipenko V.A., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N. Irregular geomagnetic disturbances embedded into substorms as a cause of induced currents in electric power lines. *Proc. XLI Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity, 2018. P. 26–29.

Pirjola R. Electromagnetic induction in the Earth by a plane wave or by fields of line currents harmonic in time and space. *Geophysica*. 1982. Vol. 18. P. 1–161.

Pirjola R. On currents induced in power transmission systems during geomagnetic variations. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1985a. Vol. 104. P. 2825–2831.

Pirjola R. Effect of series capacitors, neutral point reactor, autotransformers and overhead shield wires on geomagnetically induced currents (GIC) in electric power transmission systems. *Ann. Geophys.* 1985b. P. 479–484.

Pirjola R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems. *Survey Geophysics*. 2002. Vol. 23. P. 71–90.

Pirjola R., Viljanen A., Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length. *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16. P. 1434–1444. DOI: [10.1007/s00585-998-1434-6](https://doi.org/10.1007/s00585-998-1434-6).

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. P. 795–805.

Pirjola R., Kauristie K., Lappalainen H., et al. Space weather risk. *Space Weather*. 2005. Vol. 3, iss. 2. S02A02. DOI: [10.1029/2004SW000112](https://doi.org/10.1029/2004SW000112).

Pititsyna N.G., Tyasto M.I., Kassinskii V.V., Lyahov N.N. Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? *Proc. 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. St. Petersburg, 2007. P. 281–290. DOI: [10.1109/EMCECO.2007.4371713](https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371713)

Pititsyna N.G., Kasinsky V.V., Villoresi G., et al. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 42, iss. 9. P. 1510–1514. DOI: [10.1016/j.asr.2007.10.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015).

Pulkkinen A., Pirjola R., Boteler D., et al. Modeling of space weather effects on pipelines. *J. Applied Geophysics*. 2001a. Vol. 48, iss. 4. P. 233–256. DOI: [10.1016/S0926-9851\(01\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00109-4).

Pulkkinen A., Viljanen A., Pajunpaa K., Pirjola R. Recordings and occurrence of geomagnetically induced currents in the Finnish natural gas pipeline network. *J. Applied Geophysics*. 2001b. Vol. 48. P. 219–231.

Pulkkinen A., Thomson A., Clarke E., McKay A. April 2000 geomagnetic storm: ionospheric drivers of large geomagnetically induced currents. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21. P. 709–717.

Pulkkinen A., Lindal S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*. 2005. Vol. 3, iss. 8. S08C03. DOI: [10.1029/2004SW000123](https://doi.org/10.1029/2004SW000123).

Pulkkinen A., Klimas A., Vassiliadis D., et al. Spatiotemporal scaling properties of the ground geomagnetic field variations. *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2006. Vol. 111, iss. A3. A03305. DOI: [10.1029/2005JA011294](https://doi.org/10.1029/2005JA011294).

Pulkkinen A., Hesse M., Kuznetsova M., Rastätter L. First-principles modeling of geomagnetically induced electromagnetic fields and currents from upstream solar wind to the surface of the Earth. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25. P. 881–893.

Pulkkinen A., Pirjola R., Viljanen A. Statistics of extreme geomagnetically induced current events. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, iss. 7. S07001. DOI: [10.1029/2008SW000388](https://doi.org/10.1029/2008SW000388).

Pulkkinen A., Hesse M., Habib S., et al. Solar shield: Forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems. *Natural Hazards*. 2010. Vol. 53. P. 333–345. DOI: [10.1007/s11069-009-9432-x](https://doi.org/10.1007/s11069-009-9432-x).

Pulkkinen A.A., Bernabeu E., Eichner J., et al. 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).

Pulkkinen A., Rastätter L., Kuznetsova M., et al. Community-wide validation of geospace model ground magnetic field perturbation predictions to support model transition to operations. *Space Weather*. 2013. Vol. 11, iss. 6. P. 369–385. DOI: [10.1002/swe.20056](https://doi.org/10.1002/swe.20056).

Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., et al. Regional-scale high-latitude extreme geoelectric fields pertaining to geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, no. 93. DOI: [10.1186/s40623-015-0255-6](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0255-6).

Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., et al. Geomagnetically induced currents: science, engineering and applications readiness. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 7. P. 828–856. DOI: [10.1002/2016SW001501](https://doi.org/10.1002/2016SW001501).

Pütke C., Kuvshinov A. Towards quantitative assessment of the hazard from space weather. Global 3D modellings of the electric field induced by a realistic geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*. 2013. Vol. 65. P. 1017.

Qiu Q., Fleeman J.A., Ball D.R. Geomagnetic Disturbance. A comprehensive approach by American Electric Power to address the impacts. *IEEE Electrification Magazine*. 2015. Vol. 3, no. 4. P. 22–33.

Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, iss. 2. S02012. DOI: [10.1029/2011SW000734](https://doi.org/10.1029/2011SW000734).

Rodger C.J., Mac Manus D.H., Dalzell M., et al. Long-term geomagnetically induced current observations from New Zealand: Peak current estimates for extreme geomagnetic storms. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 11. P. 1447–1460. DOI: [10.1002/2017SW001691](https://doi.org/10.1002/2017SW001691).

Sackinger W.M. *The Relationship of Telluric Currents to the Corrosion of Warm Arctic Pipelines*. Society of Petroleum Engineer Publ. 1991. P. 361–366.

Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula. *Proc. 7th Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. St. Petersburg, 2007. P. 291–293.

Schrijver C.J., Dobbins R., Murtagh W., Petrinec S.M. Assessing the impact of space weather on the electric power grid based on insurance claims for industrial electrical

- equipment. *Space Weather*. 2014. Vol. 12, iss. 7. P. 487–498. DOI: [10.1002/2014SW001066](https://doi.org/10.1002/2014SW001066).
- Schrijver C.S., Kauristie K., Aylward A.D., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, iss. 12. P. 2745–2807. DOI: [10.1016/j.asr.2015.03.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023).
- Schulte in den Baumen H., Moran D., Lenzen M., et al. How severe space weather can disrupt global supply chains. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 10. P. 2749–2759. DOI: [10.5194/nhess-14-2749-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-2749-2014).
- Schultz A. EMScope: A continental scale magnetotelluric observatory and data discovery resource. *Data Sci. J.* 2009. Vol. 8. P. IGY6–IGY20.
- Sokolova O., Korovkin N., Hayakawa M. *Geomagnetic Disturbances Impacts on Power Systems: Risk Analysis and Mitigation Strategies*. CRC Press, 2021. 268 p. DOI: [10.1201/9781003134152](https://doi.org/10.1201/9781003134152).
- Space Storms and Space Weather Hazards*. Ed. I.A. Daglis. NATO Sci. Ser., Kluwer, 2000. DOI: [10.1007/978-94-010-0983-6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6).
- Space Weather*, Geophys. Monogr. Ser., ed. by P. Song, H.J. Singer, G.L. Siscoe, AGU, Washington, D. C. 2001. Vol. 125. P. 353–358. DOI: [10.1029/GM125p0353](https://doi.org/10.1029/GM125p0353).
- Space Weather — Research Towards Applications in Europe* (ed. J. Liliensten), Astrophysics and Space Science Library, Springer, 2007. Vol. 344. P. 311–326. DOI: [10.1007/1-4020-5446-7](https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7).
- Stauning P. Power grid disturbances and polar cap index during geomagnetic storms. *J. Space Weather Space Climate*. 2013. Vol. 3, no. A22. DOI: [10.1051/swsc/2013044](https://doi.org/10.1051/swsc/2013044).
- Thomson A.W.P., McKay A.J., Clarke E., Reay S. J. Surface electric fields and geomagnetically induced currents in the Scottish Power grid during the 30 October 2003 geomagnetic storm. *Space Weather*. 2005. Vol. 3, iss. 11. S11002. DOI: [10.1029/2005SW000156](https://doi.org/10.1029/2005SW000156).
- Thomson A.W.P., McKay A.J., Viljanen A. A review of progress in modelling of induced geoelectric and geomagnetic fields with special regard to induced currents. *Acta Geophys.* 2009. Vol. 57. P. 209–219.
- Thomson A.W.P., Gaunt C.T., Cilliers P., et al. Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 45, iss.9. P. 1182–1190. DOI: [10.1016/j.asr.2009.11.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.023).
- Thomson A.W.P., Dawson E.B., Reay S.J. Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity. *Space Weather*. 2011. Vol. 9, iss. 10. S1000. DOI: [10.1029/2011SW000696](https://doi.org/10.1029/2011SW000696).
- Torta J.M., Marsal S., Quintana M. Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain. *Earth, Planets and Space*. 2014. Vol. 66, no. 87. DOI: [10.1186/1880-5981-66-87](https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-87).
- Tóth G., Sokolov I.V., Gombosi T.I., et al. Space weather modeling framework: A new tool for the space science community. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A12. A12226. DOI: [10.1029/2005JA011126](https://doi.org/10.1029/2005JA011126).
- Tozzi R., de Michelis P., Coco I., Giannattasio F. A preliminary risk assessment of geomagnetically induced currents over the Italian territory. *Space Weather*. 2019. Vol. 17, iss. 1. P. 46–58. DOI: [10.1029/2018SW002065](https://doi.org/10.1029/2018SW002065).
- Tsagouri I., Belehaki A., Bergeot N., et al. Progress in space weather modeling in an operational environment. *J. Space Weather Space Climate*. 2013. Vol. 3, no. A17. DOI: [10.1051/swsc/2013037](https://doi.org/10.1051/swsc/2013037).
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events. *Space Weather*. 2007. Vol. 5, iss. 12. S12003. DOI: [10.1029/2007SW000329](https://doi.org/10.1029/2007SW000329).
- Trichtchenko L., Boteler D.H. Modelling of geomagnetic induction in pipelines. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1063–1072. DOI: [10.5194/angeo-20-1063-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1063-2002).
- Trichtchenko L.D., Boteler D. Modeling geomagnetically induced currents using geomagnetic indices and data. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. Vol. 32, iss. 4. P. 1459–1467. DOI: [10.1109/TPS.2004.830993](https://doi.org/10.1109/TPS.2004.830993).
- Trivedi N.B., Vitorello Í., Kabata W., Dutra S.L.G., Padilha A.L., Bologna M.S., de Pádua M.B., et al. Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study. *Space Weather*. 2007, vol. 5, iss.4. S04004. DOI: [10.1029/2006SW000282](https://doi.org/10.1029/2006SW000282).
- Troshichev O., Janzhura A. *Space Weather Monitoring by Ground-Based Means: PC Index*. Springer, 2012. 288 p. DOI: [10.1007/978-3-642-16803-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16803-1).
- Veeramany A., Unwin S.D., Coles G.A., et al. Framework for modeling high-impact, low-frequency power grid events to support risk-informed decisions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2016. Vol. 18. P. 125–137. DOI: [10.1016/j.ijdrr.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.06.008).
- Viljanen A. Geomagnetically induced currents in the Finnish natural gas pipeline. *Geofísica*. 1989. Vol. 25. P. 135–159.
- Viljanen A. The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks. *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. P. 631–634.
- Viljanen A. Relation of geomagnetically induced currents and local geomagnetic variations. *IEEE Transactions Power Delivery*. 1998. Vol. 13. P. 1285–1290.
- Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system, A geophysical review. *Surv. Geophys.* 1994. Vol. 15, no. 4. P. 383–408.
- Viljanen A., Tanskanen E. Climatology of rapid geomagnetic variations at high latitudes over two solar cycles. *Ann. Geophys.* 2011. Vol. 29, iss. 10. P. 1783–1792. DOI: [10.5194/angeo-29-1783-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1783-2011).
- Viljanen A., Amm O., Pirjola R. Modelling geomagnetically induced currents during different ionospheric situations. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 28059–28072. DOI: [10.1029/1999JA900337](https://doi.org/10.1029/1999JA900337).
- Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpaa K., Pulkkinen A. Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19. P. 1107–1118.
- Viljanen A., Pulkkinen A., Amm O., Pirjola R. Fast computation of the geoelectric field using the method of elementary current systems and planar Earth model. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, P. 101–113. DOI: [10.5194/angeo-22-101-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-101-2004).
- Viljanen A., Tanskanen E. I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field. *Ann. Geophys.* 2006a. Vol. 24, iss. 2. P. 725–733. DOI: [10.5194/angeo-24-725-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006).
- Viljanen A., Pulkkinen A., Pirjola R., et al. Recordings of geomagnetically induced currents and a nowcasting service of the Finnish natural gas pipeline. *Space Weather*. 2006b. Vol. 4, iss. 10. S10004. DOI: [10.1029/2006SW000234](https://doi.org/10.1029/2006SW000234).
- Viljanen A., Pirjola R., Wik M., et al. Continental scale modelling of geomagnetically induced currents. *J. Space Weather Space Climate*. 2012. Vol. 2, no. A17. DOI: [10.1051/swsc/2012017](https://doi.org/10.1051/swsc/2012017).
- Viljanen A., Pirjola R., Pracser E., et al. Geomagnetically induced currents in Europe: Characteristics based on a local power grid model. *Space Weather*. 2013. Vol. 11, iss. 10. P. 575–584. DOI: [10.1002/swe.20098](https://doi.org/10.1002/swe.20098).
- Viljanen A., Pirjola R., Pracser E., et al. Geomagnetically induced currents in Europe. *J. Space Weather Space Climate*. 2014. Vol. 4, no. A09. DOI: [10.1051/swsc/2014006](https://doi.org/10.1051/swsc/2014006).
- Viljanen A., Wintoft P., Wik M. Regional estimation of geomagnetically induced currents based on the local magnetic or electric field. *J. Space Weather Space Climate*. 2015. Vol. 5, iss. A24. DOI: [10.1051/swsc/2015022](https://doi.org/10.1051/swsc/2015022).
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., et al. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russian J. Earth Science*. 2020. Vol. 20. ES6001. DOI: [10.2205/2020ES000721](https://doi.org/10.2205/2020ES000721).
- Wait J. *Geo-electromagnetism*. New York: Elsevier, 1982. 278 p.

- Wang W., Wiltberger M., Burns A.G., et al. Initial results from the coupled magnetosphere–ionosphere–thermosphere model: thermosphere–ionosphere responses. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66, iss. 15–16. P. 1425–1441. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.04.008).
- Watari S., Kunitake M., Kitamura K., et al. Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan. *Space Weather*. 2009. Vol. 7, iss. 3. DOI: [10.1029/2008SW000417](https://doi.org/10.1029/2008SW000417).
- Wei L.H., Homeier N., Gannon J.L. Surface electric fields for North America during historical geomagnetic storms. *Space Weather*. 2013. Vol. 11. P. 451–462. DOI: [10.1002/swe.20073](https://doi.org/10.1002/swe.20073).
- 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, iss. A7. 1298. DOI: [10.1029/2002JA009627](https://doi.org/10.1029/2002JA009627).
- Weimer D.R. An empirical model of ground-level geomagnetic perturbations. *Space Weather*. 2013. Vol. 11. P. 107–120. DOI: [10.1002/swe.20030](https://doi.org/10.1002/swe.20030).
- Wik M., Viljanen A., Pirjola R., et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, iss. 7. S07005. S07005. DOI: [10.1029/2007SW000343](https://doi.org/10.1029/2007SW000343).
- Wik M., Pirjola R., Lundstedt H., et al. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27, no. 4. P. 1775–1787.
- Wintoft P. Study of the solar wind coupling to the time difference horizontal geomagnetic field. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 1949–1957. DOI: [10.5194/angeo-23-1949-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-1949-2005).
- Yagova N.V., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A., Selivanov V.A. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73. DOI: [10.21203/rs.3.rs-39394/v2](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-39394/v2).
- Zhang J.J., Wang C., Tang B.B. Modeling geomagnetically induced electric field and currents by combining a global MHD model with a local one-dimensional method. *Space Weather*. 2012. Vol. 10. S05005. DOI: [10.1029/2012SW000772](https://doi.org/10.1029/2012SW000772).
- Zhang J.J., Wang C., Sun T.R., et al. GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation. *Space Weather*. 2015. Vol. 13, iss. 10. P. 643–655. DOI: [10.1002/2015SW001263](https://doi.org/10.1002/2015SW001263).
- Zheng K., Trichtchenko L., Pirjola R., Liu L.G. Effects of geophysical parameters on GIC illustrated by benchmark network modeling. *IEEE Transactions Power Delivery*. 2013. Vol. 28. P. 1183–1191. DOI: [10.1109/TPWRD.2013.2249119](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2249119). URL: <http://eurisgic.org> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <https://www.earthscope.org> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: www.geo.fmi.fi/image (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <http://csem.engin.umich.edu/swmf> (дата обращения 16 июня 2021 г.).
- URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <https://en.vedur.is/weather/forecasts/aurora> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <http://kho.unis.no> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: <https://www.swpc.noaa.gov> (дата обращения 11 ноября 2021 г.).
- URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office (дата обращения 11 ноября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 72–110. DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).