ВЕСТНИК ОНЗ РАН, ТОМ 11, NZ1105, https://doi.org/10.2205/2019NZ000362, 2019

Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России

Лучший способ отметить годовщину ... это
сосредоточить внимание на нерешенных задачах.

В. И. Ленин, *ПСС, 44:221.*

В. А. Пилипенко[1,2], Р. И. Краснопёров[1], А. А. Соловьёв[1,2]

pilipenko_va@mail.ru

[1]Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), Москва
[2]Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва

Абстракт

Эта статья составлена на основе доклада, представленного на конференции «Пушковские чтения 2019: Магнетизм на Земле и в Космосе», посвященной памяти основателя ИЗМИРАН Н. В. Пушкова. Автор заметки приглашает коллег-геофизиков к разговору о проблемах отечественной геофизической науки. Высказывается парадоксальная точка зрения, что основной проблемой, обрекающей российскую геофизику на неизбежное отставание от мирового уровня, является не столько недостаточное финансирование, сколько отсутствие свободного доступа к данным. Приведены примеры научных продуктов высокого уровня, характеризующих планетарные или региональные особенности геомагнитных возмущений, которые были разработаны благодаря свободному доступу к мировым данным по космической геофизике: УНЧ-индекс, виртуальные магнитограммы, магнитные кеограммы. Ставится вопрос о необходимости внедрения новых геомагнитных индексов для территории РФ.

Ключевые слова: российская геофизика, Пушков Н. В., геомагнетизм, геомагнитные индексы, распространение данных

Ссылка: Пилипенко, В. А., Р. И. Краснопёров, А. А. Соловьёв, (2019), Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России, *Вестник ОНЗ РАН*, 11, NZ1105, https://doi.org/10.2205/2019NZ000362.

Эта статья составлена на основе доклада, представленного на конференции «Пушковские чтения 2019: Магнетизм на Земле и в Космосе» [https://pushkov2019.izmiran.ru], посвященной памяти основателя ИЗМИРАН Н. В. Пушкова (17 мая 1903–28 января 1981). На конференции было большое число интересных докладов по историческим аспектам исследований солнечно-земных связей и геомагнетизма в нашей стране. Это особенно отрадно на фоне сожженного ИНИОН, находящихся под угрозой закрытия архивов РАН, прекратившего существование журнала «История наук о Земле», и пр. Для сопоставления, заметим, что на факультетах истории науки и техники ведущих университетов США значительное число американских аспирантов и

дипломников исследуют различные аспекты истории советской науки. По их мнению, мощная наука СССР, возникшая в нищей и разоренной войнами стране – это уникальное явление мировой культуры и истории, которое необходимо детально изучать. Но в стране – наследнице СССР к истории отечественной науки относятся с крайним пренебрежением.

А зачем вообще изучать магнитное поле? Данные в геомагнетизме накапливаются годами и десятилетиями, так что стремительных прорывов в ближайшее время ждать не приходится, а при этом эти работы требуют не только непрерывных наземных наблюдений, зачастую в труднодоступных районах Арктики и Антарктики, но и спутниковых наблюдений. Зачем поддерживать столь недешевые работы? На самом же деле, на единицу научной продукции стоимость космической геофизики не столь уж высока. Это объясняется своеобразием исследований космической погоды по сравнению с другими областями физики.

Принципиальная особенность современной геофизики и космической физики состоит в том, что все полученные в мире данные переводятся в свободный доступ. Например, NASA в обязательном порядке требует, чтобы данные финансируемых ей спутниковых проектов выкладывались в свободный доступ практически в реальном времени. NASA также создало специальный центр данных по космическим наукам NSSDC [https://nssdc.gsfc.nasa.gov] в Годдардовском центре космических полетов, который собирает, хранит и предоставляет бесплатный доступ ко всем научным данным спутниковых миссий NASA и ESA. Другой пример – данные более 300 наземных магнитных станций собираются на портале SuperMAG [http://supermag.jhuapl.edu], финансируемым U.S. National Science Foundation. Унифицированные и очищенные от помех данные не только свободно доступны всем исследователям, но портал предоставляет программные средства для их анализа. Наконец, ведущие геофизические журналы Американского геофизического союза (например, Journal of Geophysical Research) ввели политику FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), согласно которой все авторы обязаны обеспечить свободный доступ к данным, используемым в публикуемых статьях.

С нашей точки зрения, они – идиоты! Потратить десятки, а то и сотни миллионов долларов на космический проект, и свободно предоставлять его данные всему миру, чтобы каждый мог писать статейки на их основе!? Мы, конечно, не такие дураки – данных геофизических станций РАН в свободном доступе практически нет, и их можно получить только путем личного обращения, да и то лишь для короткого выбранного интервала. Данные же Росгидромета, Роскосмоса, и других ведомств, невозможно получить ни с какими обращениями. Поэтому нарастающая провинциальность российской геофизики по сравнению с мировым уровнем связана не столько с недостатком финансирования, сколько с тем, что они – идиоты, а мы – себе на уме. Поэтому «идиоты» получают с помощью мирового сообщества массу научных результатов от своих проектов, развивают технологии, весь мир бесплатно тестирует их данные, а «умные» – ограничиваются размещением вымпела в труднодоступных точках планеты и полной безвестностью в научном поле.

В то же время, ресурсы в стране для этого есть – например, Геофизический центр РАН (ГЦ РАН) [http://www.gcras.ru] имеет все возможности и потенциал стать российским центром сбора геомагнитных данных [http://geomag.gcras.ru/], аналогичным SuperMAG, Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) [http://www.iki.rssi.ru] может стать центром по сбору научных спутниковых

данных, аналогичным NSSDC. Экспериментаторы, предоставившие свои данные в эти центры, могли бы оформить индикатор DOI (Digital Object Identifier) к своей базе данных, который бы цитировался в статьях, использовавших эти данные. Тем самым индексы цитируемости экспериментаторов-геофизиков значительно возрастут. В этом отношении в нашей стране также определенный прогресс имеется. Стоит упомянуть проект Геофизического центра РАН Earth Science DataBase (ESDB) [http://esdb.wdcb.ru/], предназначенный для регистрации и присвоения DOI широкому спектру отечественных массивов данных по наукам о Земле.

Благодаря мировой политике свободного доступа к космическим и наземным данным, в солнечно-земной физике любой человек с персональным компьютером и интернетом, если у него есть оригинальные идеи, может успешно конкурировать с крупнейшими мировыми научными центрами! Благодаря этому научная отдача от мировых космических и геофизических проектов необычайно велика.

Далее мы приведем примеры научных продуктов высокого уровня, характеризующих планетарные или региональные особенности геомагнитных возмущений, которые широко используются мировой геофизикой и были разработаны всего несколькими сотрудниками ГЦ РАН и ИФЗ РАН благодаря свободному доступу к мировым данным по космической геофизики.

УНЧ индекс

Ни один из существующих геомагнитных индексов или стандартных параметров космической погоды не отражает уровень турбулентности и волновой активности в околоземной среде, хотя процессы передачи энергии от солнечного ветра к магнитосфере и ионосфере Земли носят нестационарный и турбулентный характер. Для оценки глобальной волновой активности и уровня магнитогидродинамической турбулентности в околоземном пространстве предложен новый геомагнитный УНЧ (ультра-низкочастотный) индекс [*Pilipenko et al.,* 2017]. Физической основой этого индекса является тот факт, что турбулентный перенос энергии в пограничных областях магнитосферы при наземных и спутниковых наблюдениях отражается в появлении волновой активности в УНЧ диапазоне (1–10 мГц) – частотном диапазоне естественных магнитосферных магнитогидродинамических (МГД) волноводов и резонаторов. Для расчета наземного варианта индекса используются данные наблюдений на глобальной сети магнитометров северного полушария, включающей более 100 станций [*Kozyreva et al.,* 2007]. Кроме того, аналогичные УНЧ индексы, характеризующие уровень низкочастотной магнитной турбулентности и волновой активности на геостационарной орбите и в солнечном ветре, рассчитаны по данным геостационарных и межпланетных спутников.

Значения УНЧ индекса к настоящему времени рассчитаны для периода 1991–2018 гг., но эта база данных продолжает уточняться и расширяться. Индекс может быть использован в различных областях космической геофизики: для понимания роли волнового нагрева плазмы магнитосферы в механизме суббури [*Goertz and Smith,* 1989], описания резонансного ускорения магнитосферных электронов до релятивистских энергий [*Degeling et al.,* 2011], изучения роли флуктуаций солнечного ветра при его взаимодействии с магнитосферой [*Lyons et al.,* 2009], построения волнового портрета магнитной бури [*Козырева и Клейменова*, 2008; 2009; 2010], и даже для дискриминации УНЧ шумов, вызванных подготовкой землетрясений [*Hattori,* 2004; *Currie and Waters*, 2014].

Сопоставление вариаций потоков релятивистских электронов (с энергиями примерно несколько МэВ) на геостационарной орбите во время серии магнитных бурь 1994 г. с Dst-индексом на рис. 1 показывает, что величина отклика внешнего радиационного пояса совершенно не определяется величиной магнитной бури – после сильной бури с |Dst|~200 нТл потоки никак не изменились, в то же время через 1–2 дня после слабых бурь потоки существенно возросли. Этот рисунок иллюстрирует, что динамику релятивистских электронов значительно лучше, чем любой из стандартных индексов, характеризует УНЧ индекс [*Potapov et al.,* 2014]. Этот факт подтверждает существование в земной магнитосфере природного «геосинхротрона», в котором захваченные в геомагнитное поле электроны ускоряются при резонансном взаимодействии с УНЧ волнами [*Elkington et al.,* 1999].

Рис. 1. Вариации потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите во время серии магнитных бурь 1994 г.: Dst-индекс, потоки электронов с энергиями 1,8–3,5 МэВ на спутнике LANL и с энергиями >2 МэВ на спутнике GOES-7, и вариации УНЧ индекса (красная линия – кумулятивный УНЧ индекс).

На основании многолетних данных по регистрации потоков релятивистских электронов на геостационарных спутниках с помощью множественного регрессионного анализа построена статистическая модель, позволяющая предсказать максимальное значение среднесуточного потока электронов по набору межпланетных и геомагнитных параметров, включая и УНЧ индекс [*Simms et al.,* 2014; 2016]. Корреляция между наблюдениями и предсказаниями находится в диапазоне ~0,7–0,9.

Хотя солнечный ветер является турбулентным, в исследованиях взаимодействия между потоком плазмы солнечного ветра, межпланетным магнитным полем (ММП), и магнитосферой этот факт игнорируется. На самом деле, оказывается, что магнитосфера реагирует на вариации солнечного ветра и ММП по-разному, в зависимости от уровня турбулентности: когда солнечный ветер более турбулентен, степень его воздействия на магнитосферу выше [*Borovsky and Funsten,* 2001]. Для иллюстрации этого предположения на рис. 2 авроральный отклик, характеризуемый индексом AE, сравнивается Bz-компонентой ММП для ламинарного (когда уровень флуктуаций ММП низкий, $\sigma < 2$) и турбулентного (когда $\sigma > 2$) потоков. Средние значения AE-индекса для турбулентного солнечного ветра при той же величине Bz оказываются выше, чем для ламинарного! Разница наиболее значительна для северного ММП Bz > 0, когда можно ожидать, что вязкое взаимодействие будет

доминировать по сравнению с пересоединением межпланетного и магнитосферного полей [*Kim et al.,* 2011]. Таким образом, благодаря наличию базы данных с УНЧ индексом легко показать статистически, что магнитосфера реагирует на ММП слабее, когда уровень турбулентности солнечного ветра низок [*Romanova and Pilipenko,* 2008].

Рис. 2. Авроральный AE-индекс (точки – отдельные значения, линия – среднее значение) для турбулентного (красный) и ламинарного (синий) потоков солнечного ветра.

База данных и детальное описание УНЧ индекса находятся в свободном доступе через специально разработанный сайт http://ulf.gcras.ru/. База данных содержит месячные ASCII-файлы со значениями УНЧ индекса и основных параметров космической погоды, магнитограммы использованных станций, и графики индекса.

Виртуальные магнитограммы

Магнитные возмущения на Земле, являющиеся отражением процессов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, можно контролировать, сравнивая временные ряды магнитных записей и параметров космической погоды. Однако серьезным недостатком анализа наземных магнитограмм является неизбежная вариация магнитного отклика, вызванная постоянными изменениями местоположения станции относительно Солнца и магнитосферы. Идеальным, но невозможным решением этой трудности, которое могло бы разделить временные и пространственные вариации, было бы развертывание «стационарной» обсерватории с фиксированным положением в солнечно-магнитосферной системе координат.

Однако желаемый результат можно получить с помощью метода «виртуальных магнитограмм» (ВМ) [*Kozyreva et al.,* 2019]. Этот метод был реализован для ключевых областей магнитосферы (ночная авроральная область и дневной касп) как инструмент для мониторинга реакции магнитосферы на вариации солнечного ветра и ММП. ВМ для фиксированной системы отсчета строится путем 2D-интерполяции 1-мин магнитограмм с мировой сети магнитных станций (>300).

Помимо суббурь, реакция магнитосферы на воздействие солнечного ветра и ММП включает «пилообразные» (sawtooth) колебания, которые представляют собой квазипериодическую (с периодичностью 2–3 часа) серию изолированных

суббурь, сопровождающихся инжекциями энергичных частиц. Пилообразные колебания предположительно обусловлены либо серией повышений давления солнечного ветра на фоне длительного южного ММП, либо они являются внутренним магнитосферным откликом с собственной периодичностью на устойчивое повышенное поступление энергии солнечного ветра.

Рис. 3. Плотность Np и электрическое поле E=-V*Bz солнечного ветра, индекс SYM-H, индексы северной и южной полярных шапок PCN-PCS, авроральный индекс AE, и виртуальные магнитограммы для полуночного (00 MLT) и полуденного (12 MLT) меридианов для северного (синие линии) и южного (красные линии) полушарий в период пилообразных колебаний 14 октября 2000 г.

В качестве примера, на рис. 3 показано применение ВМ к выделению и анализу пилообразных колебаний. ВМ для события 14 октября 2000 г. ясно показывает квазипериодический характер отклика магнитосферы в ночное время (00 MLT) на фоне слабой магнитной бури (индекс |SYM-H|~100 нТл), обусловленный постоянным (более 17 часов) ММП южного направления Bz, что соответствует положительному электрическому полю солнечного ветра Ey. Временной ряд ВМ указывает на появление 8 суббурь с амплитудами магнитных бухт от ~200 нТл до ~700 нТл. Интенсификация каждой суббури более отчетливо видна на ВМ, чем в поведении AE или PC индексов. Кроме того, анализ одной комбинированной ВМ гораздо проще, чем стандартный анализ многочисленных магнитограмм из множества станций с неизбежной пространственно-временной неопределенностью.

База данных рассчитанных ВМ, а также одновременные межпланетные параметры (плотность и электрическое поле солнечного ветра) и геомагнитные индексы (SYMH, PC, AE), свободно доступны через специально спроектированный сайт [http://vm.gcras.ru] для всех заинтересованных исследователей. ВМ были рассчитаны на период с 1994 г. по настоящее время. Широкий спектр исследований космической физики, таких как инициирование

суббурь, воздействие вариаций солнечного ветра на ионосферу, реакция ионосферной конвекции на вариации ММП, взаимодействие между полушариями и т.д., выиграют от внедрения ВМ.

Магнитные кеограммы для анализа пространственно-временной структуры геомагнитных возмущений

Характеристики усилений вариабельности геомагнитного поля, т.е. увеличения dB/dt, важны как для понимания механизмов формирования тонкой структуры геомагнитных возмущений, так и для практических задач, т.к. быстрые изменения геомагнитных полей могут возбуждать большие геоиндуцированные токи (ГИТ), которые могут оказывать вредное воздействие на технологические системы. Для детального изучения широтной структуры магнитной вариабельности и ее связи с авроральными границами была применена новая методика «магнитных кеограмм» к данным наблюдений в Фенноскандии и Северо-Западе России на сети станций вдоль геомагнитного меридиана ~110° [*Kozyreva et al.,* 2019]. Этот метод достаточно прост для массовой обработки и помогает выделить временную и широтную локализацию всплесков dB/dt. В принципе, эта методика также могла бы по положению текущего максимума в пространственном распределении иррегулярных магнитных шумов определить область ионосферной проекции зарождения суббури и ее дальнейшей эволюции, т.к. повышенный уровень геомагнитных флуктуаций оказался довольно эффективным индикатором зарождения суббури [*Murphy et al.,* 2009].

Резкие изменения геомагнитного поля могут быть вызваны началом суббури, изолированными магнитными импульсами длительностью ~10 минут, и пульсациями Ps6/Pc5 (периоды 5–15 минут). Эти возмущения сопровождаются повышениями dB/dt, которое может превышать обычно используемый порог в 5 нТл/с для потенциальной опасности сбоев в работе электрических сетей. Оказалось, что положение максимального магнитного возмущения ΔB не совпадает, как правило, с положением эпицентра dB/dt [*Kozyreva et al.,* 2018]. Вариабельность геомагнитного поля сопоставлялась с величиной ГИТ в магистральной линии электропередачи (ЛЭП) 330 кВ на пункте «Выходной» (VKH) на северо-западе РФ на геомагнитной широте Φ = 65°.

Начало авроральной суббури 17.03.2015. Эта суббуря с резким началом примерно в 23:20 UT и значительной интенсивностью – региональный индекс EI (electrojet indicator) достигал значений ~1600 нТл. В компоненте X видна движущаяся к полюсу магнитная бухта (рис. 4а). В компонентах Y и Z начало суббури проявляется в виде интенсивного локализованного импульса длительностью ~20 мин, достигающего максимума ~10^3 нТл на Φ ~66°–67°. Наибольшая изменчивость магнитного поля dZ/dt ~22 нТл/с достигается в Z-компоненте на широте ~ 68°, тогда как амплитуды dX/dt и dY/dt несколько слабее ~18 нТл/с.

Магнитная кеограмма показывает широтную локализацию вариабельности геомагнитного поля dB/dt и ее эволюцию во времени (рис. 4б). Отчетливо видно перемещение всплеска изменчивости магнитного поля к полюсу. Интенсивные флуктуации возникают вблизи экваториальной границы диффузного сияния, а затем расширяются к высоким широтам почти до полюсной границы моноэнергетических полярных сияний. Когда область интенсивных dB/dt пересекает широту 65° станции наблюдения «Выходной», станция зарегистрировала всплеск ГИТ $J > 50$ А.

Рис. 4а. Авроральная суббуря 17.03.2015: магнитограммы компонент X, Y и Z. Коды станций и их геомагнитные координаты показаны рядом с правыми вертикальными осями.

Рис. 4б. Кеограмма изменчивости магнитного поля |dB/dt| (логарифмическая шкала) для авроральной суббури 17 мар. 2015. На пространственную структуру магнитной вариабельности наложены границы аврорального овала в заданном секторе местного времени, оцененные с помощью модели OVATION-prime, основанной на измерениях энергичных частиц [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?model=Ovation%20Prime]. Границы моноэнергетических полярных сияний отмечены точечными линиями, а границы диффузных сияний – пунктирными линиями, экваториальные и полюсные границы показаны красным и синим цветом, соответственно.На рисунке показаны индекс EI (вторая панель), магнитограммы X-компонент для нескольких характерных станций (третья панель) и величина ГИТ на станции «Выходной» (нижняя панель) на Ф=65°.

Серия ночных Ps6 пульсаций 07.10.2015. Суббуря началась в 18:45 UT (рис. 5a). После фазы расширения суббури в течение 18:45–19:00 UT наблюдаются интенсивные нерегулярные пульсации Ps6 – квазипериодическая последовательность магнитных импульсов длительностью 3–7 минут. Эти пульсации являются не гармоническими колебаниями, а серией нелинейных магнитных импульсов с крутыми фронтами. Пульсации Ps6 наиболее заметны в Y-компоненте, и магнитная изменчивость также является самой большой в Y-компоненте, dY/dt >> dX/dt, dZ/dt. Благодаря крутым фронтам этих импульсов изменчивость поля высока, до ~20 нТл/с.

Рис. 5a. Серия магнитных импульсов (пульсации Ps6) 07.10.2015: магнитограммы в том же формате, что и на рис. 4a.

Эти пульсации Ps6 вызывают квазипериодическое усиление ГИТ (рис. 5b). ГИТ достигает максимальной величины >25 А не во время начала суббури, а во время одного из последующих импульсов.

Таким образом, магнитные кеограммы наглядно показывают, что начало авроральной суббури дает наибольший магнитный отклик на земле и всплеск интенсивных ГИТ (несколько десятков А), когда при движении к полюсу область усиления dB/dt пересекает широту ЛЭП. Изолированные ночные магнитные импульсы также достаточно эффективны для возбуждения ГИТ (>10 А), но они относительно редки [*Vorobev et al.,* 2019a]. Квазипериодические серии импульсов, известные как пульсации Ps6, оказались весьма эффективны для длительного возбуждения ГИТ с величиной около 20 А и даже выше. Таким образом, спорадически появляющиеся на фоне глобальных возмущений «космической грозы» – суббурь, локальные космические «молнии» – магнитные импульсы и оказываются источником всплесков ГИТ [*Belakhovsky et al.,* 2019]. Тонкая структура суббури, интересная казалось бы только космофизикам, оказалась исключительно важной для понимания энергетиками механизмов возбуждения ГИТ в ЛЭП.

Рис. 5б. Кеограмма изменчивости магнитного поля dB/dt (верхняя панель) с наложенными авроральными границами, полученными из модели OP, для пульсаций Ps6, индекс EI (вторая панель), магнитограммы X-компонент на нескольких характерных станциях (третья панель) и величина ГИТ на станции «Выходной» (нижняя панель).

Необходимость региональных геомагнитных индексов

Геоэффективность космической погоды, как правило, характеризуется геомагнитными планетарными индексами: Dst-индекс для интенсивности кольцевого тока магнитосферы, Kp-индекс для геомагнитной возмущенности на средних широтах, и AE/AU/AL индексы для интенсивности авроральных ионосферных токов. Предложены дополнительные индексы для характеристики специфических особенностей воздействия солнечного ветра и ММП на магнитосферу: PC-индекс, характеризующий интенсивность трансполярного тока через полярную шапку [https://pcindex.org]; УНЧ-индекс, характеризующий уровень геомагнитных флуктуаций в диапазоне частот Pc5 пульсаций [http://ulf.gcras.ru].

Все стандартные геомагнитные индексы рассчитываются по данным станций, крайне неравномерно распределённых по земной поверхности. Кроме того, единое число не может однозначно характеризовать магнитную активность на разных широтах и в разных долготных секторах. В связи с этим, делаются попытки разработать индексы для разных MLT секторов, например, предложен EI (electrojet indicator) индекс для Фенноскандии по данным станций IMAGE [http://space.fmi.fi/image/www/il_index_panel.php]. Однако, пока не существует

индекса, адекватно характеризующего геомагнитную обстановку на территории РФ. В то же время, статистические исследования связи вариаций геомагнитного поля и ГИТ показали, что стандартные геомагнитные индексы, характеризующие суббуревую активность (AE, PC) недостаточны для предсказания величины ГИТ в российских ЛЭП [*Vorobev et al.,* 2019a].

Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности вызываются протяженным авроральным электроджетом, создающим на земной поверхности магнитные возмущения, лежащие в основе AE индекса. Однако в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, значительный вклад могут вносить мелкомасштабные ионосферные токовые структуры [*Belakhovsky et al.,* 2019]. Необходима разработка не только новых региональных индексов авроральной геомагнитной активности для российского сектора, но и создание индекса, характеризующего вариабельность поля.

Основная часть российских станций ведут регулярные наблюдения и их данные поступают в мировые базы данных SuperMAG и INTERMAGNET, хотя еще есть немало российских станций, данные которых малодоступны мировому геофизическому сообществу. В качестве тестовых региональных индексов были предложены:

- Новый 1-мин SME-R индекс (аналог SME), но рассчитываемый по данным российских станций;
- Новый 1-часовой dB/dt-max индекс, который характеризует вариабельность поля. В качестве такого индекса рассчитывается максимальное значение за 1 час модуля производной dB/dt $\frac{dB}{dt}=\sqrt{\left(\frac{dX}{dt}\right)^2+\left(\frac{dY}{dt}\right)^2+\left(\frac{dZ}{dt}\right)^2}$.

Региональный индекс сопоставлялся со стандартными индексами:

- планетарный SME 1-мин индекс (SuperMAG) [http://supermag.jhuapl.edu/indices], который является обобщением классического AE-индекса (11 станций) на 100 станций.
- региональный EI индекс (по данным меридиональной сети станций IMAGE)

Анализ магнитных бурь 2015 г. (рис. 6) показывает существенное расхождение между планетарными индексами и региональным SME-R индексом.

Для апробации новых региональных индексов построена регрессионная модель, описывающая связь между этими индексами и интенсивностью ГИТ |J|:

$$|J|=\sum_{i=1}^{N}\left(w_i\cdot C_i\right)\pm\sigma, \qquad (1)$$

где C_i – геомагнитные региональные индексы SME-R и dB/dt-max, w_i – весовой коэффициент; σ – среднеквадратическая ошибка.

Корреляционные взаимосвязи между J и новыми индексами для больших временных рядов оказались высокими, на уровне R~0,8 (рис. 7). Среднеквадратическая ошибка модели ~0,26 [A], т.е. не более нескольких %. В тоже время стандартные AE- SME-индексы коррелируют гораздо хуже.

Рис. 6. Тестовый вариант геомагнитного регионального индекса SME-R (красная линия), планетарный SME-индекс (зеленая линия), и региональный индекс IE (синяя линия). Вертикальные пунктирные линии соответствуют моментам начал суббури, определенным по методике SuperMAG [http://supermag.jhuapl.edu/substorms/].

Рис. 7. Результаты регрессионной модели для предсказания величины ГИТ в ЛЭП на северо-западе РФ, построенной по региональному индексу SME-R (верхняя панель) и по индексу dB/dt-max (нижняя панель).

Предварительный анализ магнитных бурь в 2015 г. показал, что региональный индекс SME-R может существенно отличаться от планетарных индексов SME и AE. Поэтому применение таких планетарных индексов для изучения геофизических явлений в Российском секторе может приводить к некорректным результатам. Таким образом имеет смысл использовать региональный dB/dt индекс и SME-R-индекс для территории РФ. Пробные варианты индексов будут выложены в свободный доступ на сайте ГЦ РАН. Все замечания и пожелания заинтересованных исследований будут тщательно изучены и учтены при разработке следующих версий.

Что больше всего тормозит развитие отечественной геофизики?

Вернемся к обсуждению поставленного вопроса – что же сдерживает больше всего развитие отечественной геофизики? С нашей точки зрения, основной проблемой является не столько недостаточное финансирование, сколько отсутствие отечественных баз данных и разработанных моделей в свободном доступе. В лучшем случае на сайты обсерваторий выкладываются картинки, бесполезные для серьезных исследований. Попытки в институтах РАН перевести имеющиеся архивы данных в свободный доступ немногочисленны и сдерживаются отсутствием свободных квалифицированных рук. Данные же организаций из других ведомств вообще полностью закрыты для исследователей.

Например, по западным работам мы знаем об опасности ГИТ, достигающих в ЛЭП величин до нескольких сотен А. Испытывают ли такие же проблемы отечественные энергетические компании? Узнать это невозможно, т.к. архив сбоев в работе энергосетей недоступен. И какой практической отдачи от отечественных исследователей тогда можно ожидать? Путем героических усилий, сотрудникам ПГИ РАН удалось на некоторых подстанциях на Кольском полуострове установить регистрацию ГИТ в нейтралях трансформаторов [*Sakharov et al.*, 2007]. Но о расширении этих наблюдений энергетики даже слышать не хотят. Даже информация о материалах сердечников трансформаторов, которую можно было бы использовать для моделирования воздействия ГИТ на режим их работы, недоступна научному сообществу.

В западных центрах широким фронтом идут работы по моделированию динамики потоков релятивистских электронов в околоземном пространстве. Представляют ли эти электроны-«убийцы» опасность для отечественных спутниковых миссий – мир никогда не узнает, т.к. база данных сбоев в работе спутниковой электроники недоступна для анализа.

С другой стороны, крайне низкая цитируемость российских работ в мировой науке в значительной степени является отражением не научной слабости отечественных работ или злокозненности зарубежных исследователей, а отсутствием свободного доступа к статьям (особенно переводным) на сайтах российских научных журналов.

И перечень таких примеров, когда ведомственная зашоренность и закрытость тормозит развитие прикладных аспектов геофизики, можно продолжать и продолжать… Существующую принципиальную проблему получения информации от государственных ведомств и компаний для научного анализа можно решить только на уровне Минобрнауки, и если бы это ведомство обратило внимание на эту проблему, то оно оказало бы реальную помощь российской геофизике.

Благодарности

Развиваемые направления, примеры которых приведены в статье, поддерживаются грантом РНФ 17-77-20034. Выражаем благодарность А. Н. Зайцеву и Л. И. Мирошниченко за полезные обсуждения. В работе использовались данные и сервисы ЦКП "Аналитический центр геомагнитных данных" Геофизического центра РАН.

Литература

Козырева О. В., Клейменова Н. Г. Оценка уровня дневной волновой геомагнитной активности во время магнитных бурь с помощью нового ULF индекса // Геомагнетизм и Аэрономия. 48, 511-519. 2008.

Козырева О. В., Клейменова Н. Г. Вариации ULF-индекса геомагнитных пульсаций во время сильных магнитных бурь, Геомагнетизм и Аэрономия. 49. 446–459. 2009.

Козырева О. В., Клейменова Н. Г. Вариации ULF-индекса дневных геомагнитных пульсаций во время рекуррентных магнитных бурь, Геомагнетизм и Аэрономия. 50. №6. 799–809. 2010.

Belakhovsky, V., V. Pilipenko, M. Engebretson, Ya. Sakharov, and V. Selivanov (2019) Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines, J. Space Weather and Space Climate, 10.1051/swsc/2019015.

Borovsky, J. E., and H. O. Funsten (2003) The MHD turbulence in the Earth's plasma sheet: Dynamics, dissipation, and driving, J. Geophys. Res., 108, 1284, doi:10.1029/2002JA009625.

Currie, J. L., and C. L. Waters (2014) On the use of geomagnetic indices and ULF waves for earthquake precursor signatures, J. Geophys. Res., 119, 992–1003.

Degeling, A. W., R. Rankin, and S. R. Elkington (2011) Convective and diffusive ULF wave driven radiation belt electron transport, J. Geophys. Res., 116, A12217, doi:10.1029/2011JA016896.

Elkington, S. R., M. K. Hudson, and A. A. Chan (1999) Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc5 ULF oscillations, Geophys. Res. Lett., 26, 3273–3276.

Goertz, C. K., and R. A. Smith (1989) The thermal catastrophe model of substorms, J. Geophys. Res., 94, 6581–6596.

Hattori, K. (2004) ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes, Terr. Atmos. Ocean Sci., 15(3), 329–360.

Kim, H. J., et al. (2011) Statistical study of the effect of ULF fluctuations in the IMF on the cross polar cap potential drop for northward IMF. J. Geophys. Res., 116, A10311. doi: 10.1029/2011JA016931

Kozyreva O., et al. (2007) In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons, Planetary and Space Science, 55, 755–769.

Kozyreva O. V., V. A. Pilipenko, V. B. Belakhovsky, and Ya.A. Sakharov (2018) Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015, storm, Earth, Planetary and Space, 70:157, doi: 10.1186/s40623-018-0933-2.

Kozyreva O. V., V. A. Pilipenko, A. A. Soloviev, and M. J. Engebretson (2019a), Virtual magnetograms – a tool for the study of geomagnetic response to the solar wind/IMF driving, Russ. J. Earth. Sci., 19, ES2005, doi:10.2205/2019ES000654.

Kozyreva O., et al. (2019b), Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents, Annals of Geophysics, 62, N4.

Lyons L. R., et al. (2009) Evidence that solar wind fluctuations substantially affect global convection and substorm occurrence, J. Geophys. Res., 114, A11306, doi:10.1029/2009JA014281.

Murphy, K. R., et al. (2009) Wavelet-based ULF wave diagnosis of substorm expansion phase onset, J. Geophys. Res., 114, A00C16, doi:10.1029/2008JA013548.

Pilipenko, V. A., O. V. Kozyreva, M. J. Engebretson, and A. A. Soloviev, ULF wave power index for the space weather and geophysical applications: A review, Russ. J. Earth. Sci., 17, N2, ES1004, doi:10.2205/2017ES000597, 2017.

Potapov, A. S., B. Tsegmed, and L. V. Ryzhakova (2014) Solar cycle variation of "killer" electrons at geosynchronous orbit and electron flux correlation with the solar wind parameters and ULF waves intensity, Acta Astronautica, 93, 55–63.

Romanova N., and Pilipenko V. (2008) ULF wave indices to characterize the solar wind – magnetosophere interaction and relativistic electron dynamics, Acta Geophysica, 57, 158–170.

Sakharov Ya. A., Danilin A. N., and Ostafiychuk R. M. (2007) Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula. Proc. of 7-th symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St-Petersburg: 291–293. IEEE, ISBN: 9781424412693

Simms, L. E., et al. (2014) Prediction of relativistic electron flux at geostationary orbit following storms: Multiple regression analysis, J. Geophys. Res., 119, 10.1002/2014JA019955.

Simms, L. E., et al. (2016) Empirical predictive models of daily relativistic electron flux at geostationary orbit: Multiple regression analysis, J. Geophys. Res., 121, 3181–3197.

Vorobev A. V., V. A. Pilipenko, Ya.A. Sakharov, and V. N. Selivanov (2019a), Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet and geomagnetically induced currents, Solar-Terrestrial Physics, 5, 35–42, doi:10.12737/stp-512019052018.

Vorobev A. V., V. A. Pilipenko, and M. J. Engebretson (2019b) Nightside magnetic impulsive events: Statistics and possible mechanisms, in: "Trigger Effects in Geosystems", 607–614, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, G. Kocharyan and A. Lyakhov (eds.), doi:10.1007/978-3-030-31970-0.