

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**ПРАКТИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ
ГЕЛИОГЕОФИЗИКИ**

**МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ СЕКЦИИ
«ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАУКИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ»**

ОДИННАДЦАТОЙ ЕЖЕГОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ»

17 февраля 2016 г.

Под редакцией
члена-корреспондента РАН
А.А. Петруковича
А.М. Мёрзлого
С.Ю. Хабибулина

СЕРИЯ «ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ»

МОСКВА
2016

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕЛИОГЕОФИЗИКИ

МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ СЕКЦИИ

«ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАУКИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ»

ОДИННАДЦАТОЙ ЕЖЕГОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ»

(17 февраля 2016 г.)

Редакция:

Петрукович Анатолий Алексеевич, зав. отделом физики космической плазмы, ФГБУН ИКИ РАН, д.ф.-м.н., apetruko@iki.rssi.ru.

Мёрзлый Алексей Михайлович, с.н.с., ФГБУН ИКИ РАН, к.т.н., pinega@list.ru.

Хабибулин Сергей Юрьевич, с.н.с., ЦСКБ ОАО «РТИ», к.т.н., geoservise@bk.ru.

Petrukovich Anatoli, head of space plasma physics department, Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, apetruko@iki.rssi.ru.

Mërzlyy Aleksei, senior scientist, Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, pinega@list.ru.

Khabibulin Sergei, senior scientist, Central Design Bureau JSC «RTI», geoservise@bk.ru.

Сборник включает материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» одиннадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (Физика плазмы – 2016), прошедшей 15–19 февраля 2016 г. в Институте космических исследований РАН и посвящённой обсуждению вопросов влияния космической погоды на техносферу, практическому применению моделей окружающего космического пространства (ионосферы, магнитосферы и др.) в интересах повышения эффективности работы различных средств и систем (РЛС, связи, навигации и др.)

Ключевые слова: космическая погода, магнитосфера, ионосфера, гелиогеофизика.

редактор издания: *Мёрзлый А.М.*

дизайн издания осуществлен «ИКИ ДИЗАЙН» отдела 31 ИКИ РАН

верстка: *Титова А.Ю.*

Электронная версия сборника размещена на сайте ИКИ РАН <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>.

Интенсивное технологическое развитие современной цивилизации материализовало еще одну угрозу для современных технических средств и систем различного назначения – воздействие гелиогеофизической обстановки (космической погоды). Космическая погода – это сложный комплекс энергоёмких и переменных во времени явлений и процессов, происходящих в солнечной атмосфере, окружающем космическом пространстве и атмосфере Земли. Ее поражающими факторами являются электромагнитное излучение в широком диапазоне спектра и потоки ускоренных заряженных частиц (радиации). Космическая погода оказывает прямое и опосредованное влияние на системы и средства космического и наземного базирования, в том числе и на системы военного назначения. В данном сборнике с участием ведущих российских специалистов рассматриваются все аспекты проблематики мониторинга, моделирования, прогноза космической погоды и использования этих результатов в практической деятельности.

Intense technological development of modern civilization materialized yet another threat to the modern technical equipment and systems for various applications – impact of the heliogeophysical environment (space weather). Space weather – is a complex set of energetic time-varying phenomena and processes in the solar atmosphere, the near-Earth space and the Earth's atmosphere. Its affecting factors are electromagnetic emissions in a wide spectral range and flows of accelerated charged particles (radiation). Space weather directly and indirectly affects space and ground-based systems and facilities, including military systems. In this book the leading Russian specialists examined all aspects of the monitoring, simulations, forecasting and applications in practice.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
Петрукович А.А., Ермолаев Ю.И., Эйсмонт Н.А. МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ЦЕЛЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ.....	11
Гайдаш С.П., Белов А.В., Абуни А.А., Абунина М.А. ЦЕНТР ПРОГНОЗОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ (ИЗМИРАН).....	22
Канониди К.Х., Зайцев А.Н., Петров В.Г., Гидеон А.А., Абрагимов С.В. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЛЕНТА (ДИСПЛЕЙ) ПО КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ.....	33
Самсонов А.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГД МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ	45
Алпатов В.В., Васильев А.Е., Будников П.А., Молодцов Д.А., Репин А.Ю. НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ – СЕТЬ РАДИОТОМОГРАФИИ.....	56
Оводенко В.Б., Трекин В.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ NEQUICK ДЛЯ РЛС УКВ ДИАПАЗОНА	64
Титов А.А., Хаттатов В.У. МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РФ.....	68
Аджемов С.С., Виноградов А.Г., Лобов Е.М., Теохаров А.Н. ПРЯМАЯ ОЦЕНКА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ (ТЕС) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА	76
Хабibuлин С.Ю., Мёрзлый А.М., Петрукович А.А., Филатов В.Н., Шевляков А.С. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ И КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ.....	88

Мёрзлый А.М., Виноградов А.Г., Кузьмин А.К., Никифоров О.В., Крученицкий Г.М., Теохаров А.Н., Трёкин В.В., Хабибулин С.Ю.	
СИСТЕМА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.....	95
Подладчикова Т.В., Шприц Ю.Ю., Келерман А.	
НАСТРОЙКА ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	106
Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Доброленский Ю.С., Крученицкий Г.М., Маслов И.А., Мёрзлый А.М., Моисеев П.П., Потанин Ю.Н., Чувашов И.Н.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАВАЕМОГО ОРБИТАЛЬНОГО ИМАДЖЕРА АВРОВИЗОР-ВИС/МП И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ И ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НЕОДНОРОДНОСТИ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ	114
Сахаров Я.А., Катькалов Ю.В., Селиванов В.Н., Вильянен А.	
РЕГИСТРАЦИЯ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ	134
Калегаяев В.В., Бобровников С.Ю., Кузнецов Н.В., Мягкова И.Н., Шугай Ю.С.	
ЦЕНТР ОПЕРАТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НИИЯФ МГУ	146

ПРЕДИСЛОВИЕ

Солнце – главный источник энергии в Солнечной системе. Кроме постоянного потока тепловой энергии, формирующего комфортные условия для жизни на Земле, Солнце испускает и переменные корпускулярные потоки (солнечный ветер и солнечные космические лучи), а также электромагнитное излучение в рентгеновском, ультрафиолетовом и радио диапазонах. Интенсивность этого переменного компонента составляет доли процента от интенсивности постоянного излучения Солнца и изменяется как постепенно, так и скачкообразно в ходе 11-летнего цикла солнечной активности.

Воздействие солнечного ветра, космических лучей, электромагнитного излучения Солнца на геомагнитное поле и атмосферу Земли приводит к поглощению и трансформации энергии, поступающей от Солнца, и, в конечном счете, определяет состояние околоземного космического пространства, атмосферы и ряда геофизических параметров на поверхности Земли. Совокупность подобных эффектов получила название «космическая погода» или «гелиогеофизическая обстановка» (ГГФО).

Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле, переносимое им, взаимодействуют с геомагнитным полем, формируя магнитосферу Земли, которая обладает существенной внутренне обусловленной динамикой и генерирует собственные корпускулярные потоки и электромагнитные сигналы.

Солнечный ветер присутствует постоянно, но солнечные вспышки и корональные дыры на поверхности Солнца создают аномальные по амплитуде возмущения солнечного ветра, вызывающие магнитные бури – катастрофические изменения в магнитосфере и ионосфере Земли. Солнечное рентгеновское, ультрафиолетовое и радио излучение и солнечные космические лучи также наблюдаются в основном после солнечных вспышек.

В сумме, к основным факторам ГГФО (космической погоды) относят [1]:

- радиационный фон в космосе и на Земле, создаваемый СКЛ, коротковолновым электромагнитным излучением Солнца, радиационными поясами магнитосферы, а также галактическими космическими лучами (ГКЛ);
- модификацию атмосферы Земли под действием внешних причин (высыпаний плазмы, солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучения);
- потоки заряженных частиц низких энергий;

- электромагнитные шумы различных частот от низкочастотных геомагнитных вариаций до сотен МГц (солнечного, магнитосферного и ионосферного происхождения).

Единственным проявлением космической погоды, заметным невооруженному техническими средствами человеку, являются полярные сияния. Все многообразие динамики космической погоды было осознано только с началом промышленной революции в XVIII–XIX веках, в частности, в связи с ее воздействием на магнитные измерения (работу компаса) и проводной телеграф. Однако только в 1859 г. после регистрации крупнейшей солнечной вспышки все наземные проявления (магнитные бури, полярные сияния и пр.) были однозначно связаны с солнечной активностью.

В начале и середине XX века основным потребителем информации о космической погоде стала отрасль радиосвязи, прежде всего, из-за критической зависимости распространения коротких волн от состояния ионосферы. Именно в интересах связистов были впервые созданы элементы современной науки о космической погоде, включавшие понимание причинно-следственных связей в системе «Солнце–Земля», средства мониторинга, методы прогноза, а также алгоритмы учета влияния солнечной активности при расчете радиотрасс.

Развитие космической и электронной техники во второй половине XX века позволило не только достичь детального понимания физических механизмов космической погоды, но почувствовать все многообразие ее воздействия на современную технику. Влиянию космической погоды подвержены практически все космические средства. На Земле наиболее сильные ее проявления локализованы в полярных регионах. Можно выделить следующие негативные последствия воздействия факторов ГГФО:

- отказы аппаратуры КА, вызванные возрастанием потока проникающей радиации и электростатическими разрядами;
- нерасчетные изменения орбиты низколетящих спутников;
- возрастание радиационной нагрузки на космонавтов и экипажи самолетов;
- помехи в работе наземной и космической связи, дальней радиолокации, спутниковой навигации;
- помехи в работе магистральных линий электропередач, систем сигнализации и защиты трубопроводов, железных дорог.

По оценке экспертов прямые и косвенные потери от влияния космической погоды на сложные технические системы значительны и измеряются миллиардами долларов США в год. Например, прямые потери от аварии в энергосистеме Канады из-за геомагнитной бури в марте 1989 года составили \$30 млн, а последующее создание системы блокировки такого воздействия обошлись в \$1.2 млрд. Министерство обороны США оценивает стоимость мероприятий по парированию влияния космической погоды на свою орбитальную группировку в ~ \$500 млн. и потери от сбоев в гражданских КА ~ \$100 млн. в год.

В США работы по исследованию влияния космической погоды и обеспечению надежного функционирования технических систем ведутся в соответствии

со стратегическим планом национальной программы по космической погоде (NSWP), принятым в 2010 году на период 10 лет [2]. Схожие программы реализуются и во многих других, прежде всего имеющих выход в полярную зону, странах. Число космических аппаратов (в основном, американских), передающих данные мониторинга в режиме реального времени, составляет более десятка единиц, различных наземных станций – более сотни. Значительный объем этих данных доступен через сеть Интернет, но прикладные исследования, как правило, носят закрытый характер.

Важность данной проблематики для России трудно переоценить, особенно, в связи с развитой космической программой, оборонными разработками, освоением Арктики. В соответствии со «Стратегией деятельности в области гидрометеорологии...» в рамках федеральной целевой программы «Геофизика» намечено развертывание в РФ системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации, которое включает и мониторинг космической погоды [3].

Однако в настоящее время в России в интересах мониторинга ГГФО функционирует только один-два космических аппарата, передающих весьма малую часть необходимых наблюдений [4]. Восстанавливается сеть наземных наблюдений. До 90 % наблюдательных данных, на основе которых формируется прогноз ГГФО в интересах российских заказчиков, поступают из-за границы. Прежде всего используются зарубежные наблюдения солнечной активности и солнечного ветра. Доступность этих данных не регулируется международными соглашениями и в любой момент может быть ограничена.

Российский опыт использования информации о космической погоде различными министерствами и ведомствами выявил целый комплекс проблем [5–7]: отсутствие системности, низкую оперативность поступления информации, ее недостаточность для уточнения применяемых моделей и прогноза, отсутствие моделей, адаптированных к конкретным средствам и системам, районам их развертывания и решаемым задачам.

Планы размещения средств мониторинга гелиогеофизической обстановки Росгидромета и других ведомственных сетей (организаций ФАНО/РАН, университетов) слабо скоординированы как между собой, так и с планами развертывания средств и систем различного назначения у потенциального заказчика.

С другой стороны, у потенциальных потребителей зачастую отсутствует понимание степени необходимости сведений о ГГФО, как в части технического обоснования, так и в части коммерческой целесообразности, отсутствует ведомственная и федеральная нормативная база, регламентирующая использование информации по ГГФО в производственных процессах. Например, не регламентирован учет условий ГГФО во время запусков ракет космического назначения. По многим отраслям информация о сбоях технологических систем, которые могут быть связаны с воздействием ГГФО, является закрытой. У ряда потребителей не решен вопрос методического обеспечения программно-аппаратных комплексов, создаваемых в целях снижения негативного влияния геофизической среды на характеристики систем.

Необходимо отметить следующие основные принципы, которые должны приниматься во внимание при решении вышеупомянутых проблем:

Комплексность. Должны проводиться одновременные круглосуточные наблюдения всех необходимых параметров от поверхности Солнца до геомагнитного поля на поверхности земли (часть измерений при этом может быть выполнена только в космосе). Сеть станций (космических аппаратов) для таких наблюдений должна быть сформирована на основе межведомственной координации. Должна быть сформирована структура взаимосвязанных моделей среды и технических средств потребителя, обеспечивающих прогноз и учет влияния среды.

Целевой характер. Приоритет должен отдаваться мониторингу (вычислению) параметров, непосредственно необходимых для работы конкретных технических систем. Структурирование по принципу целевого использования также поможет сформировать приоритеты при определении источников финансирования. Для обеспечения эффективности работы в этом направлении должно быть налажено партнерство научных организаций и потенциальных потребителей.

Принцип «минимальной достаточности». Для обеспечения автономности критических элементов российской сети мониторинга и прогноза (в том числе общего прогноза в интересах многих потребителей) в условиях крайнего разнообразия объектов и процессов, за которыми в настоящее время ведется наблюдение в международной кооперации, и ограниченности бюджетных средств, необходимо формирование «оптимального» списка параметров и моделей.

В качестве первоочередных конкретных мер необходимы:

- уточнение перечня контролируемых гелиогеофизических параметров, необходимого для решения задач компенсации негативного влияния на средства Заказчиков;
- формирование требований к составу, объему, оперативности выдачи указанных параметров среды, точности их представления;
- формирование требуемого состава датчиков геофизических полей, районов их размещения, возможной системы сбора геофизической информации;
- разработка наиболее рационального состава математических моделей;
- уточнение подходов оперативной корректировки моделей среды по текущим данным датчиков геофизических полей;
- уточнение перечня задач, решаемых специализированной геофизической службой в интересах потребителей.

В данном сборнике представлены публикации ведущих российских специалистов по всем направлениям прикладных исследований по тематике космической погоды: выявлению причинно-следственных связей и моделированию процессов в системе Солнце–Земля, созданию моделей влияния на технические системы, методам и средствам мониторинга и прогноза ГГФО, методам и технологиям учета и парирования эффектов ГГФО в технических системах. Сборник подготовлен по материалам специализированной секции по космической погоде, проведенной в рамках 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 15–19 февраля 2016 г в ИКИ РАН, Москва.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Петрукович А.А.* Солнечно-земные связи и космическая погода // В кн. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. В 2-х т. М.: Физматлит, 2008.
- [2] The National Space Weather Program Strategic Plan, FCM-P30-2010. Washington, DC, June 2010. URL: <http://www.ofcm.gov>.
- [3] Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации 3 сентября (2010) № 1458-р. URL: http://www.global-climate-change.ru/download/Strategy_rgm.pdf.
- [4] *Буров В.А., Журавлев С.В., Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В., Шувалов В.А., Яковлев А.А.* Программа наблюдения геофизических процессов и технология построения космических средств перспективной системы мониторинга геофизической обстановки. Материалы второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: ВНИИЭМ, 2014.
- [5] *Аксёнов О.Ю., Боев С.Ф., Виноградов А.Г., Лучин А.А., Потехин А.П.* Проблемные вопросы создания системы прогноза геогелиогеофизических условий функционирования радиолокационных станций сверхдальнего обнаружения. Труды XXIV Всероссийской Научной Конференции Распространения Радиоволн (РРВ-24), посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова. Иркутск, 2014. Т. IV, секция 6. С. 5-8.
- [6] *Аксёнов О.Ю., Аникин В.А., Борисов Ю.А., Кондранин Т.В., Кузьмин А.К., Лапшин В.Б., Ляхов А.Н., Мёрзлый А.М., Потанин Ю.Н., Салтанов П.Я., Свидский П.М., Трёкин В.В.* Основы развития перспективной системы контроля состояния фоновой обстановки в полярной ионосфере и ее краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли: препринт – Москва, Россия: ЦАО–МФТИ, 2015. – 40 с.
- [7] *Аксёнов О.Ю., Долганов А.А., Ляхов А.Н., Мёрзлый А.М., Петрукович А.А., Оводенко В.Б., Саранченков В.А., Соколов К.С., Трёкин В.В., Якубовский С.В.* Гелиогеофизика арктической зоны: фундаментальные и прикладные аспекты, материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО и комплексов управления и обработки информации», 2015.

МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ЦЕЛЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

А.А. Петрукович, Ю.И. Ермолаев, Н.А. Эйсмонт

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва

Гелиогеофизическая обстановка в околоземном космическом пространстве формируется в результате действия сложной цепи явлений, передающих эффекты солнечной активности на поверхности Солнца через межпланетную среду к Земле. Краткосрочный прогноз магнитных и ионосферных бурь, формируемый за несколько суток по данным наблюдений Солнца, далеко не всегда носит количественный характер. С другой стороны, наблюдения солнечного ветра вблизи Земли позволяют сформировать оперативный прогноз амплитуды магнитных бурь и других возмущений на несколько часов вперед. Для проведения таких наблюдений необходим запуск спутника в переднюю точку либрации системы Солнце–Земля.

Ключевые слова: космическая погода, солнечный ветер, прогноз.

1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянный поток тепловой энергии Солнца обеспечивает развитие жизни на Земле. Солнце испускает также и слабое переменное корпускулярное (солнечный ветер (СВ) и солнечные космические лучи) и электромагнитное рентгеновское, ультрафиолетовое и радио излучение. Межпланетное магнитное поле (ММП), переносимое солнечным ветром, взаимодействуя с геомагнитным полем, активизирует собственную динамику магнитосферы и ионосферы Земли. Интенсивность этих процессов в первую очередь определяется амплитудой и ориентацией ММП и параметрами плазмы СВ (скоростью, плотностью). В частности, выбросы корональной массы, часто сопровождающие солнечные вспышки, и корональные дыры создают аномальные возмущения солнечного ветра, вызывающие магнитные бури – катастрофические изменения в магнитосфере и ионосфере Земли [1].

Вариации условий на Земле и в околоземном космическом пространстве (ОКП), связанные с данной солнечной переменностью называют космической погодой или гелиогеофизической обстановкой (ГГФО). К факторам ГГФО (космической погоды) относят: радиационный фон в космосе и на Земле, модификацию атмосферы Земли, потоки заряженных частиц низких энергий, электромагнитные шумы различных частот от низкочастотных геомагнитных вариаций до сотен МГц.

Действие данных факторов на технологические системы приводит к следующим основным негативным последствиям: отказам аппаратуры КА; нерасчет-

Петрукович Анатолий Алексеевич – зав. отделом физики космической плазмы, ИКИ РАН, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., apetruko@iki.rssi.ru.

Ермолаев Юрий Иванович – зав. лабораторией, ИКИ РАН, д.ф.-м.н., yermol@iki.rssi.ru.

Эйсмонт Натан Андреевич – ведущий научный сотрудник, ИКИ РАН, к.т.н., neismont@iki.rssi.ru.

ному изменению орбиты низколетящих спутников; возрастанию радиационной нагрузки на космонавтов и экипажи самолетов; помехам в работе каналов наземной и космической связи, дальней радиолокации, сбоям в работе спутниковой навигации; неэффективной работе систем сигнализации и защиты трубопроводов, магистральных линий электропередач, железных дорог.

В интересах обеспечения работоспособности различных технических систем ведется мониторинг ГГФО и вырабатывается прогноз развития ГГФО с различной заблаговременностью от месяцев до часов.

В данной статье рассмотрен вопрос развития системы прогноза ГГФО с использованием относительно нового метода мониторинга солнечного ветра вблизи точки либрации (точки Лагранжа) L1 системы Солнце–Земля.

2. ПРОГНОЗ ГГФО ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА

При прогнозе ГГФО основным рабочим инструментом в настоящее время является краткосрочный прогноз воздействия зарегистрированных солнечных возмущений (вспышек, выбросов корональной массы, корональных дыр) на Землю, опирающийся только на наблюдения Солнца. Рентгеновское излучение и солнечные космические лучи имеют высокую скорость распространения (8 мин и несколько часов соответственно), и регистрируются практически мгновенно после начала вспышечных процессов на Солнце. Поэтому основной задачей краткосрочного прогноза является предсказание магнитных бурь, вызываемых аномальными потоками солнечного ветра и межпланетным магнитным полем. Заблаговременность такого прогноза – 1–3 суток (время распространения возмущения в солнечном ветре до Земли). Основным продуктом прогноза является информация о времени начала магнитной бури и о силе бури (в терминах глобальных геомагнитных индексов), ожидаемых исходя из статистики всех предыдущих наблюдений, сопоставляющих солнечную и геомагнитную активность. Все необходимые в дальнейшем характеристики магнитосферы и ионосферы рассчитываются с помощью моделей, использующих геомагнитные индексы в качестве входного параметра.

Такой прогноз магнитных бурь обладает некоторыми существенными недостатками:

- Прогноз является качественным (величина и динамика развития магнитной бури не могут быть определены достаточно надежно даже в используемом представлении через глобальный геомагнитный индекс). Качество прогноза падает с ростом заблаговременности (рис. 1) [3]. Более современная версия данного графика приведена в статье Гайдаша и др. в этом сборнике.
- Время начала возмущения определяется в среднем с точностью около суток.

- Оправдываемость прогноза (по факту реального прихода возмущения) невелика, не более ~ 50 % [2]. Количество ложных предсказаний превосходит количество правильных, и довольно часто наблюдаются события (бури), которые не были предсказаны.

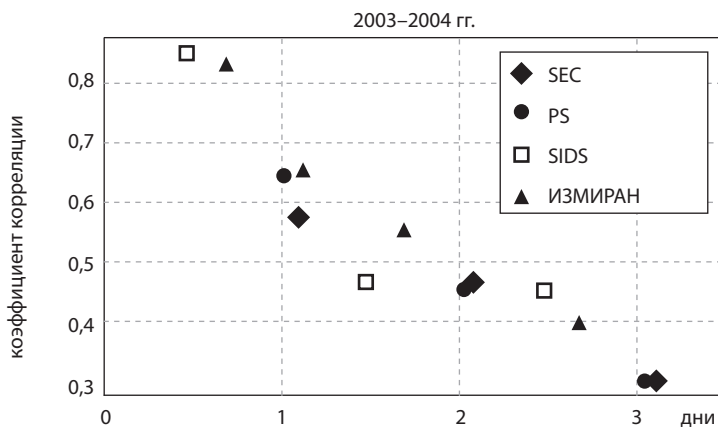


рис. 1. Коэффициент корреляции между реальным геомагнитным индексом A_p и его прогнозом для различных прогностических центров в годы максимума солнечной активности в зависимости от заблаговременности [3].

Такое несовершенство прогноза связано с тем, что мы наблюдаем на Солнце только источники возмущений межпланетной среды, которые в дальнейшем могут попасть в окрестности Земли и вступить с ней во взаимодействие. Сама межпланетная среда – глубокий вакуум и практически не может наблюдаться дистанционными методами. Современная наука не может и точно смоделировать распространение возмущения от Солнца до Земли. В этих условиях используются приближенные (феноменологические и статистические) подходы, когда на основе предыдущих наблюдений предлагается лишь наиболее вероятный вариант развития. Таким образом, в настоящее время существует принципиальное ограничение: солнечные наблюдения не позволяют достаточно точно (и по величине параметров, и по времени прихода к Земле) предсказать состояние околоземного пространства и связанные с ним эффекты космической погоды.

Проиллюстрируем неточности суточного прогноза. Согласно современным представлениям существует два основных сценария передачи возмущения от Солнца к магнитосфере и, соответственно, возбуждения двух типов магнитных бурь: спорадических и рекуррентных. Первые связаны с выбросами корональной массы, а вторые – с корональными дырами, которые порождают высокоскоростные потоки ветра на орбите Земли [4].

Спорадические возмущения представляют собой выбросы плазмы, их геоэффективность зависит от траектории их распространения (вероятности попадания по Земле), ошибки в определении которой и приводят к большому количеству ложных тревог и пропусков, а время прихода к Земле предсказывается с точностью хуже одних суток [5].

Модели, восстанавливающие рекуррентный высокоскоростной поток солнечного ветра по данным наблюдений магнитного поля на поверхности Солнца [6] (рис. 2), так же в среднем ошибаются по времени его прихода к Земле в пределах 1–2 суток [7].

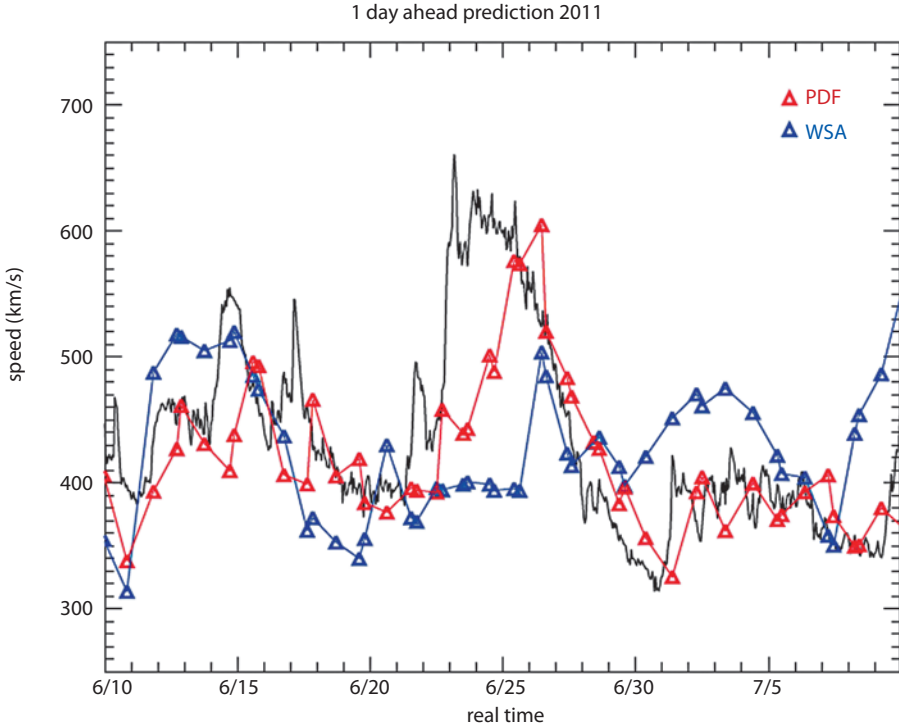


рис. 2. Измеренные (черная линия) и предсказанные (синяя и красная линии) за 1 сутки до события значения скорости солнечного ветра.

Наконец, в рамках 1–3 дневного прогноза практически невозможно оценить силу и направление ожидаемого межпланетного магнитного поля, от которых в первую очередь зависит сила магнитной бури.

Прогноз на суточных интервалах в целом также не вполне удовлетворяет потребностей оперативного управления различными постоянно работающими техническими системами, однако его детализация с использованием только солнечных данных невозможна.

3. ПРОГНОЗ ГГФО ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Знание характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля позволяет сделать количественный прогноз геомагнитной активности (в т. ч. развития магнитной бури) с практически максимально возможной при современном понимании магнитосферных процессов детализацией. Получить такие данные можно только с помощью специализированного космического аппарата (рис. 3).

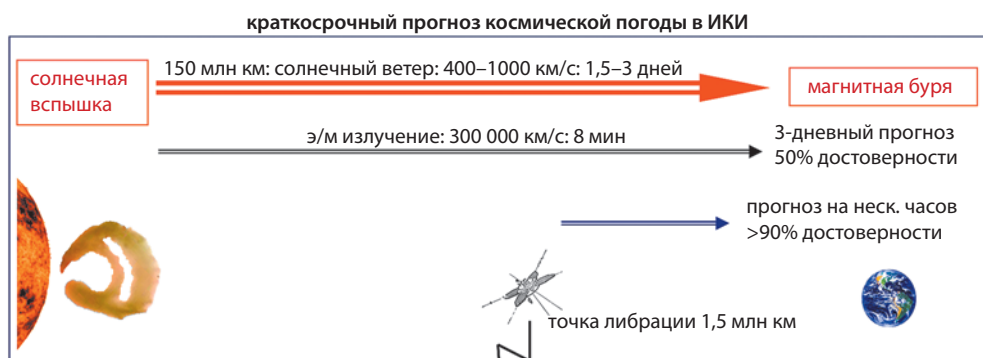


рис.3. Схема прогноза космической погоды по солнечному ветру.

Так формируется т. н. оперативный или сверхкраткосрочный прогноз ГГФО, производимый в настоящее время на основании измерений солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в передней солнечно-земной точке либрации L1 на расстоянии 1,5 млн км от Земли в сторону Солнца. Данные солнечного ветра можно использовать для прогноза геомагнитной активности в целом (при любом ее уровне) или как исходные данные для моделей ионосферы и магнитосферы.

В мире создано значительное число моделей, в том числе работающих в реальном времени и переводящих данные солнечного ветра и ММП в конкретные характеристики ионосферы, радиационных поясов и пр. Часть из них доступна в сети Интернет (например, на сайте NASA¹, США, на сайте НИИЯФ МГУ²). Пример общего прогноза амплитуды геомагнитных бурь представлен и на сайте ИКИ РАН³ (рис. 4).

Также за рубежом активно ведутся и прикладные разработки в интересах промышленных и государственных заказчиков (НАСА, нефтяные компании), однако их результаты обычно закрыты.

Требования к детальности такого мониторинга заданы Всемирной метеорологической организацией: по скважности измерений – не менее 1 мин, по точности измерений магнитного поля вне магнитосферы – не хуже 1 нТл. Требования по точности измерений плазмы не предъявлены.

Вопрос о достоверности измерений солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в точке либрации, с точки зрения их совпадения с околоземными (около 100 000 км от Земли) измерениями детально исследован. Показано, что достоверность наблюдения возмущений крупного размера, вызывающих бури, выше 90 % (по амплитуде) [8]. Достоверность наблюдения обычных вариаций солнечного ветра снижается с уменьшением их амплитуды и длительности.

Заблаговременность такого прогноза номинально составляет время порядка 1 часа (равно времени прохождения со скоростью солнечного ветра расстояния от точки либрации до Земли). С учетом известной инерционности магнитосферы и крупномасштабности структур солнечного ветра можно разработать методы увеличения заблаговременности прогноза магнитной бури до 3–6 часов [9].

¹ URL: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov>

² URL: <http://swx.sinp.msu.ru>

³ URL: <http://spaceweather.ru>

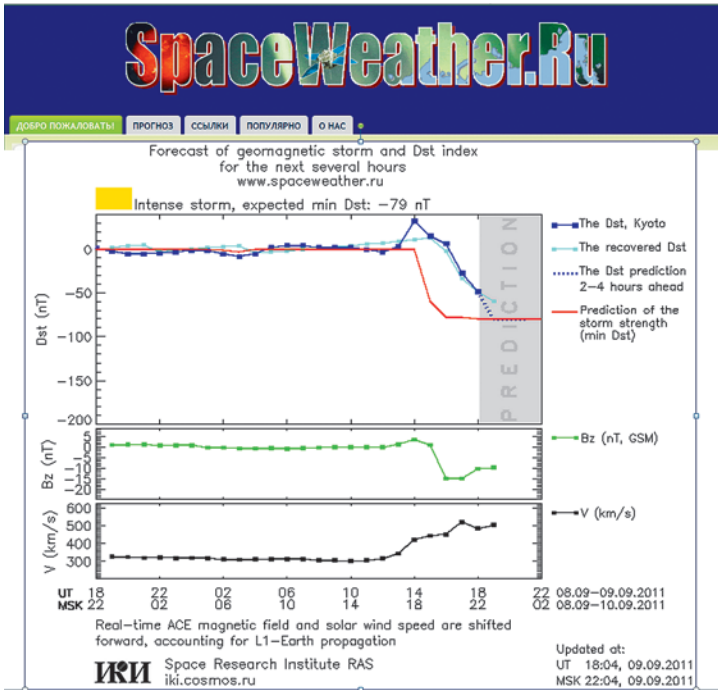


рис. 4. Пример прогноза величины магнитной бури, выполненного с заблаговременностью около 4 часов.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА

Наиболее удобна для мониторинга передняя солнечно-земная точка либрации L1, в которой КА может удерживаться перед Землей в потоке солнечного ветра несмотря на годовое движение Земли вокруг Солнца (рис. 5) с достаточно небольшим расходом топлива на расстоянии около 1,5 млн км.

В настоящее время в точке либрации уже почти 20 лет находится американский КА ACE, запущенный NASA. Данные с спутника ACE доступны через сеть Интернет в реальном времени с задержкой от измерения не более нескольких минут. В 2015 г. уже агентством NOAA, отвечающим за прогноз и мониторинг ГГФО, ему на смену запущен второй американский КА DSCOVR. Однако по состоянию на середину 2016 г. данные с этого спутника недоступны.

Данные такого мониторинга не входят в перечень метеопараметров, обмен которыми предусматривается международными соглашениями, и их свободное распространение может быть прекращено в любой момент. Также в прошлом в данных отмечалось наличие систематических ошибок. Так, с момента запуска в 1997 г. вплоть до 2004 г., данные по направлению вектора межпланетного магнитного поля передавались в реальном времени с ошибкой в 30–40 градусов, что приводило к ошибкам в оценке энергии, попадающей в магнитосферу, до двух раз, и, следовательно, невозможности достоверно оценить уровень геомагнитной активности. Ошибка была исправлена только в середине 2004 г. (рис. 6).

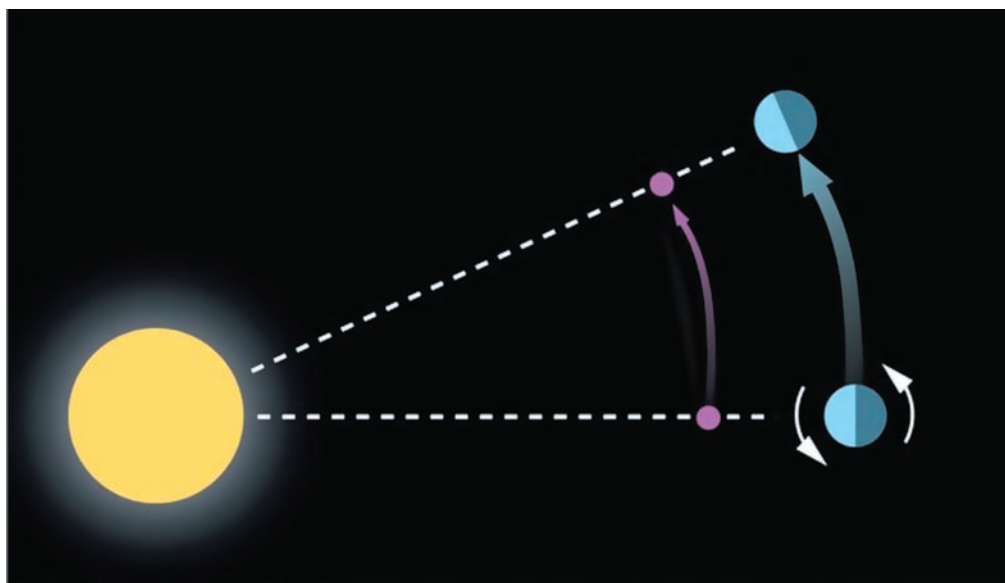


рис. 5. Размещение КА для мониторинга солнечного ветра.
Масштаб вдоль линии Солнце–Земля искажен для наглядности.

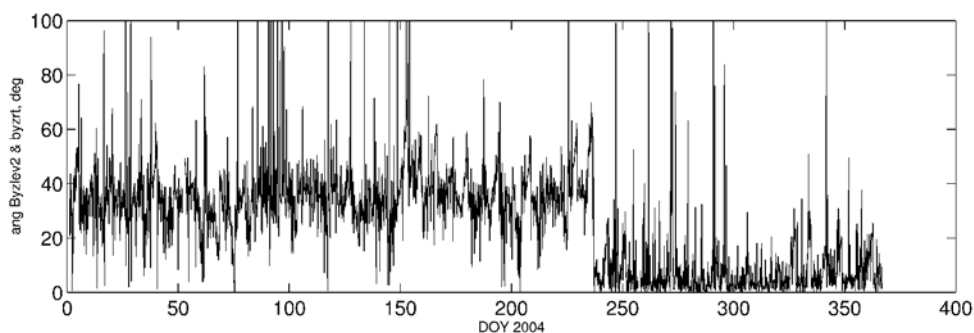


рис. 6. Отклонение угла направления магнитного поля от направления «север-юг» от реального в течение 2004 г. (в градусах).

5. КОМПЛЕКС ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ

Комплекс целевой аппаратуры должен выполнять измерения следующих основных параметров межпланетной среды:

- параметров солнечного ветра;
- вектора ММП;
- потоков энергичных частиц и СКЛ;
- спектров по энергии ионов солнечного ветра.

Примерный состав комплекса:

Магнитометр. Измеряемые параметры: вектор магнитного поля, не менее 1 изм/сек (оптимально до 32 Гц) в диапазоне не менее ± 128 нТ с разрешением

не менее 12 бит. Состав: два датчика магнитного поля (феррозондовых магнитометра) на штанге и блок электроники.

Анализатор потока солнечного ветра. Измеряемые параметры: поток, скорость и плотность солнечного ветра, отношение концентраций протонов и альфа-частиц, не менее 1 изм/сек (оптимально до 32 Гц) с разрешением не менее 12 бит.

Анализатор энергичных частиц. Измеряемые параметры: поток энергичных протонов и электронов в энергетическом диапазоне 20–1000 кэВ, не менее 1 спектра в сек с каждого детектора.

Анализатор космических лучей (при наличии возможности). Измеряемые параметры: поток протонов и электронов в энергетическом диапазоне 1–100 МэВ. Не менее 1 спектра в сек.

Анализатор солнечного ветра (при наличии возможности). Измеряемые параметры: спектр протонов и альфа частиц по энергиям, не менее 1 спектра в сек.

Система сбора целевой информации. Параметры: объем бортовой памяти – не менее 10 Гб.

В сумме масса комплекса целевой аппаратуры составит от 5 (в минимальном варианте микроспутника) до 15–20 кг, энергопотребление 10–20 Вт. Все приборы уже имеют разработанные и испытанные в космосе прототипы.

6. ТРЕБОВАНИЯ К КОСМИЧЕСКОМУ АППАРАТУ

Ключевыми техническими требованиями к КА являются:

- Наличие двигателя на борту КА для перелёта и стабилизации в точке либрации L1.
- Обеспечение 24-часового приёма информации с КА (минимальное требование – 1 кбит/с) наземными станциями. Для этого необходима станция приёма в западном полушарии (или использование КА «ЛУЧ»). Энергетика радиолинии должна позволять использование для приема и управления антенны диаметром 5–7 метров. Более полная информация может передаваться в периодических сеансах.
- КА должен быть стабилизирован вращением с периодом не более 1 мин и ориентацией оси вращения на Солнце. Точность поддержания направления на Солнце – до 10 градусов (при отсутствии приборов для мониторинга диска Солнца). Точность знания ориентации в любой момент – не хуже 10 угловых минут.
- КА должен быть магнитно и электромагнитно чистым.

Космический аппарат должен быть выведен на гало-орбиту с отклонением от точки либрации не более 200 000 км. Это может быть реализовано по следующему сценарию [10]. Разгон до второй космической скорости может быть выполнен с помощью разгонного блока (например, при попутном запуске вместе с КА к Луне). По предварительным оценкам, окно допустимых дат старта открывается

каждый месяц и его длительность составляет 2–3 дня в течение каждого месяца. После отделения выполняется маневр перехода на траекторию выведения в окрестность точки либрации. Величина необходимой коррекции не превышает 40 м/с. При этом возможны варианты с последующим гравитационным маневром у Луны и без такового.

В случае, когда гравитационный маневр не применяется, амплитуда орбиты в окрестности точки либрации в направлении, ортогональном прямой Земля – Солнце достигает одного миллиона км. Снизить эту величину до требуемых экспериментами 200 000 км можно за счет маневра изменения скорости аппарата величиной около 240 м/с. Выполнение гравитационного маневра у Луны (при этом расстояние пролета от центра Луны составляет, как правило, более 9000 км) позволяет избежать указанного расхода топлива. Правда, необходимость в корректирующем импульсе с величиной, не превышающей 40 м/с, остается.

Для удержания космического аппарата в окрестности точки либрации необходимо периодическое выполнение маневров коррекции, с суммарными затратами в течение года менее 10 м/с. Направление корректирующего импульса может быть вдоль вектора к Солнцу или от Солнца. Поэтому космический аппарат, стабилизированный вращением с осью на Солнце, не предъявляет специальных требований к системе ориентации в части обеспечения условий выполнения корректирующих импульсов, и достаточно установить двигатели с суммарным вектором тяги вдоль оси вращения.

В настоящее время возможно использование следующих вариантов платформы КА и запуска: (1) КА «СПЕКТР» или «ЛУНА-РЕСУРС-1 (ОА)» (НПО им. С. А. Лавочкина), которые разрабатываются именно для полетов по межпланетным траекториям. Однако эти КА могут нести полезную нагрузку до нескольких сотен кг, что намного превышает потребности данной задачи. Этот вариант требует целевого запуска. (2) КА «РЕЗОНАНС» (НПО им. С. А. Лавочкина) может нести полезную нагрузку до 50 кг и предназначен для высокоэллиптических орбит. Для полета в точку либрации будет необходимо провести его доработку с установкой более мощного двигателя и дополнительных баков. Этот вариант скорее всего также требует целевого запуска, в связи с общей массой до 500 кг. Использование других платформ малых КА потребует их доработки для использования на высокоэллиптических орбитах или разработки «с нуля». (3) Разработка микроспутника массой 50–100 кг с минимизированной полезной нагрузкой. Для запуска в этом случае возможно рассматривать варианты попутной нагрузки и реализации гравитационного маневра у Луны.

В качестве прототипов микроспутника можно указать российско-чехословацкие аппараты «МАГИОН-4» и «МАГИОН-5» (субспутники аппаратов «ИНТЕРБОЛ-1» и «ИНТЕРБОЛ-2»), которые были запущены на высокоэллиптические околоземные орбиты в 1995, 1996 годах и успешно эксплуатировались в течение нескольких лет. Масса каждого из этих аппаратов была в пределах 60 кг. Для управления их ориентацией и орбитальным движением использовалась газореактивная двигательная установка.

В нашем случае для управления орбитальным движением потребуется жидкостный ракетный двигатель на гидразине, имеющий удельный импульс около 2200 м/с. Если принять, что срок эксплуатации малого космического аппарата составит 5 лет, то на удержание его в окрестности точки либрации понадобится 50 м/с. На доставку в эту область без применения маневра у Луны и с амплитудой орбиты не более 200 000 км, потребуется 290 м/с. С применением такого маневра понадобится около 50 м/с. Таким образом, суммарно для миссии потребуется без маневра у Луны 330 м/с, и с гравитационным маневром 90 м/с. Это означает, что в первом случае потребуется израсходовать массу рабочего тела, составляющую 14 % начальной массы космического аппарата и 4 % – во втором случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью обеспечения российских потребителей высоконадежным прогнозом гелиогеофизической обстановки необходим запуск в точку либрации L1 российского КА с целевой аппаратурой мониторинга солнечного ветра. Наиболее экономичным вариантом является разработка микроспутника и запуск его попутным грузом на одной из российских лунных миссий. В таком случае возможна реализация данного проекта в 2020–2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Петрукович А.А.* Солнечно-земные связи и космическая погода // В кн. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. В 2-х т. М.: Физматлит, 2008.
- [2] *Gosling J.T.* The solar flare myth // *J. Geophys. Res.* 1993. 98, 18937.
- [3] *Belov A.V., Gaidash S.P., Kanonidi K.D., Kanonidi K.K., Kuznetsov V.D., Eroshenko E.A.* Operative center of the geophysical prognosis in Izmiran, *Ann. Geophys.* 2005. 23. 3163-3170.
- [4] *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: Аспекты космической погоды // *Геофиз. Проц. и Биосф.*, 2009. Т. 8. № 1. С. 5-35
- [5] *Ibrahim et al.* Transit time of CME/shock associated with four major geo-effective CMEs in solar cycle 24 // *Advances in Space Research.* 1 January 2015. V. 55. Issue 1. P. 407-415.
- [6] *Wang Y.M. Sheeley Jr. N.R.* Solar wind speed and coronal flux-tube expansion // *Astrophysical Journal*; (USA), 1990.
- [7] *Bussy-Virat C.D., Ridley A.J.* Predictions of the solar wind speed by the probability distribution function model // *Space Weather.* 2004. №12. P. 337-353.
- [8] *Petrukovich A.A., Lazarus A., Lepping R.P., Klimov S.I.* Comparison of the solar wind energy input to the magnetosphere measured by Wind and Interball-1 // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.*, 2001. 63/15, P. 1643-1647.
- [9] *Podladchikova T.V., Petrukovich A.A.* Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements // *Space weather*, 2012. V. 10, S07001, DOI: 10.1029/2012SW000786.

- [10] *Eismont N., Dunham D., Jen S.-C., Farquhar R.* Lunar swingby as a tool for halo-orbit optimization in Relict-2 project, Proc, ESA symposium on spacecraft flight dynamics, Darmstadt, Germany, 30 Sept – 4 Oct 1991, ESA SP 326, 435–439, 1991.

SOLAR WIND MONITORING FOR SPACE WEATHER FORECAST

A.A. Petrukovich, Yu. I. Yermolaev, N.A. Eismont

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow, Russia

Space weather in the near-Earth space and on the ground is formed through a complicated chain of phenomena, transferring solar activity signatures in the interplanetary medium. Short-term forecast of magnetic storms, which is formed 1–3 days ahead using solar observations, generally provides qualitative results. Solar wind observations near Earth help to form the fast quantitative forecast of geomagnetic activity several hours ahead. Such observations require a launch of a special spacecraft to Sun-Earth libration point L1.

Keywords: space weather, solar wind, forecast.

Petrukovich Anatoli – head of space plasma physics department, IKI RAN, apetruko@iki.rssi.ru.

Yermolaev Yuri – head of solar wind laboratory, IKI RAN, yermol@iki.rssi.ru.

Eismont Natan – leading scientist, IKI RAN, neismont@iki.rssi.ru.

ЦЕНТР ПРОГНОЗОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ (ИЗМИРАН)

С.П. Гайдаш, А.В. Белов, А.А. Абунин, М.А. Абунина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк

С 1998 года в ИЗМИРАН работает Центр прогнозов космической погоды – гелиогеофизическая служба, в которой результаты фундаментальных исследований по проблемам солнечно-земной физики практически используются для ежедневного прогнозирования различных параметров космической погоды на различные сроки упреждения и для оперативного обеспечения этими прогнозами заинтересованных потребителей. В статье представлена информация о данном Центре и об основных прогнозах, которые он предоставляет.

Ключевые слова: космическая погода, солнечно-земная физика, солнечная и геомагнитная активность, радиационная опасность, влияние на системы земной цивилизации, прогнозирование параметров космической погоды.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода (КП), под которой понимается комплекс процессов, происходящих на Солнце и в гелиосфере, создает прямые или опосредованные риски для нормального функционирования природных, технологических и биологических систем, находящихся на Земле, в околоземном пространстве и в любой точке солнечной системы. Поражающими факторами КП являются, характеризующиеся исключительной мощностью и переменчивостью, потоки электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне и потоки ускоренных заряженных частиц (радиации). Воздействие факторов КП на космические системы приводит к:

- накоплению поверхностного и объемного заряда на космических аппаратах (КА), способных изменить свойства материалов КА и вывести из строя радиоэлектронную аппаратуру КА;
- одиночным сбоям в радиоэлектронике КА из-за поражения высокоэнергичными частицами солнечного и галактического происхождения [Белов и др., 2004];
- нарушениям в работе оптических, магнитных и других датчиков, вызывающим отказ в выполнении заданных функций;
- ухудшению и потере связи (в разной степени, но практически на всех частотах);

Гайдаш Сергей Петрович – руководитель Центра прогнозов космической погоды, ИЗМИРАН, к.ф.-м.н, gaidash@izmiran.ru.

Белов Анатолий Владимирович – заведующий лабораторией вариаций космических лучей, ИЗМИРАН, к.ф.-м.н, abelov@izmiran.ru.

Абунин Артем Анатольевич – с.н.с., ИЗМИРАН, к.ф.-м.н, abunin@izmiran.ru.

Абунина Мария Александровна – н.с., ИЗМИРАН, abunina@izmiran.ru.

- существенному увеличению погрешности систем GPS и ГЛОНАСС;
- изменению баллистических характеристик орбит из-за нагрева верхней атмосферы и повышения ее плотности – потере высоты и нарушению ориентации, непредсказуемому сближению и возможности столкновения с другими КА и элементами космического мусора, возможности несанкционированного неуправляемого схода с орбиты;
- радиационному воздействию на космонавтов.

В наземном сегменте это воздействие приводит к:

- ухудшению и потере связи между наземными пунктами и управляемыми аппаратами космического комплекса [Зеленый и др, 2015];
- возможному поражению объектов наземной инфраструктуры при падении на Землю элементов космического мусора;
- появлению наведенных токов в протяженных проводниках, способных стать причиной аварий в электросетях, подводных кабелях, трубопроводах и в системах автоматики железных дорог;
- радиационному воздействию на экипажи и пассажиров авиарейсов (особенно трансполярных), сбоям в системах связи и аппаратуры;
- влиянию на психоэмоциональное состояние и сердечно-сосудистую систему операторов сложных и опасных систем, что может привести к снижению работоспособности и к ошибкам при выполнении поставленных задач.
- ухудшению здоровья части населения, имеющего сердечно-сосудистую патологию и т. д.

Тенденции усиления зависимости систем современных космических технологий, а также миниатюрной компьютерной техники от воздействия КП ведут к росту рисков от КП.

Мировая статистика подтверждает, что прямые и косвенные потери от влияния КП на системы земной цивилизации – огромны и измеряются миллиардами долларов США в год. Например, прямые потери от аварии в энергосистеме Канады из-за геомагнитной бури (ГМБ) в марте 1989 года составили \$30 млн. Разработка и создание системы блокировки такого воздействия обошлись в \$1,2 млрд. Министерство обороны США оценивает стоимость мероприятий по парированию влияния КП на свою орбитальную группировку в ~ \$500 млн и потери от сбоя в гражданских КА ~ \$100 млн в год (не считая прямых потерь и упущенной выгоды).

Следует также подчеркнуть, что всем отмеченным рискам и угрозам подвержены и системы военного назначения. Разница лишь в «цене вопроса» – в этом случае цена рисков измеряется другими критериями, диктуемыми уровнем решаемых задач – обеспечением обороны и безопасности страны.

В контексте решения этой проблемы в августе 1998 года в ИЗМИРАН был создан Центр прогнозов геофизической обстановки (с 2010 года – Центр прогнозов космической погоды). Мотивацией этого служили необходимость обеспечения систем экономики и обороны страны информацией по КП и имеющиеся возможности ИЗМИРАН, который всегда занимался комплексными исследованиями по проблемам солнечно-земной физики и имел достаточный научный потенциал и практический опыт фундаментальных и прикладных работ.

Центр прогнозов космической погоды (ЦПКП) в общем виде должен представлять собой упорядоченную совокупность методов и средств, необходимых для проведения прогнозирования, а также персонала, который непосредственно обеспечивает и контролирует процесс прогнозирования. Иными словами – техническую инфраструктуру, теорию прогнозирования и кадры.

За основу была взята имеющаяся инфраструктура ИЗМИРАН (средства связи и интернет), в которую были добавлены необходимые блоки, включая вновь созданную цифровую магнитную обсерваторию с уникальным кварцевым вариометром, разработанным в ИЗМИРАН. На рис. 1 представлена блок-схема основного блока ЦПКП – аналитико-прогностического блока. При этом были проанализированы цели, функции и состав отдельных подсистем, их связи с другими подсистемами. Следует отметить, что представленная система из-за отсутствия подсистемы экспертной оценки не является полностью автоматической. Созданный автоматической системой прогноз признаётся окончательным только по решению дежурной группы аналитиков-прогнозистов (экспертов), которые при выработке своего решения используют свои знания, опыт практического прогнозирования и учитывают самые свежие экспериментальные данные. Вмешательство экспертов может быть осуществлено как путем проведения более глубокого комплексного исследования исходных данных, так и изменением (с помощью системы управления) параметров, используемых в системе автоматического прогнозирования. Наш опыт показывает, что ни сейчас, ни в ближайшем будущем невозможно осуществить полное прогнозирование КП в автоматическом режиме.

Правильность принятых технических решений подтверждена многолетней практикой применения ЦПКП, точностными характеристиками создаваемой продукции и возможностью легко осуществлять модернизацию системы путем расширения номенклатуры продукции в рамках имеющейся структуры.

ВИДЫ ПРОГНОЗОВ

Создаваемые в ЦПКП прогнозы можно классифицировать по видовому признаку: солнечная активность, геомагнитная активность, потоки электронов и протонов, комплексные прогнозы, обзоры и справки. По временному признаку: сверхкраткосрочные прогнозы – с упреждением от минут до нескольких часов, краткосрочные прогнозы – от суток до нескольких суток, среднесрочные прогнозы – от нескольких суток до нескольких месяцев, долгосрочные прогнозы – от года до десятков лет и особый вид прогнозов – предупреждения о резком изменении контролируемого параметра космической погоды (алерты), которые практически не имеют временного упреждения, а выдаются немедленно – непосредственно в момент достижения тем или иным контролируемым параметром определенного уровня, который считается опасным.

При создании краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов различных аспектов КП в ЦПКП используются методики, основанные на сочетании результатов анализа временных рядов (выявление характерных цикличностей), многопараметрического и многофакторного математического моде-

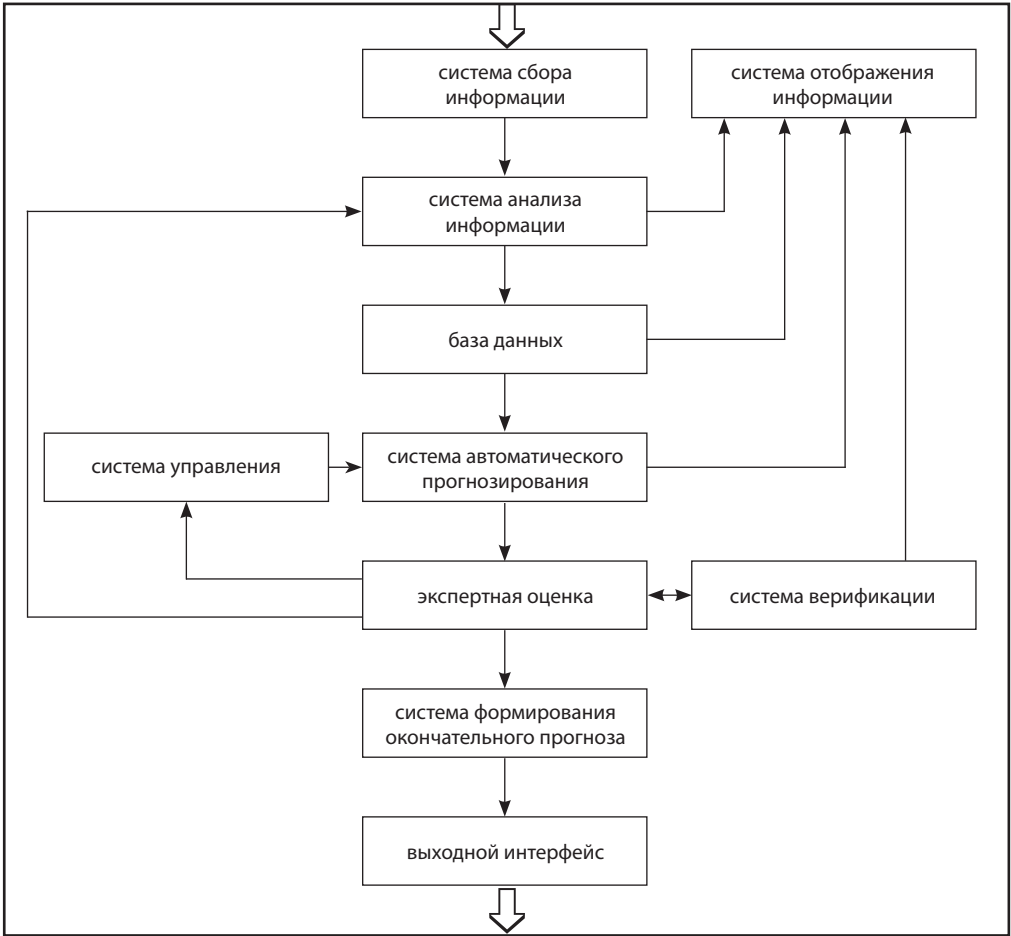


рис. 1. Структурно-функциональная блок-схема обработки информации в ЦПКП.

лирования прогнозируемого процесса и экспертного сопровождения, оценки и корректировки на всех этапах прогнозирования [Гайдаш и др., 2012; Abunina et al., 2014]. В общем случае прогнозируемый индекс КП можно представить в виде зависимости от различных циклических процессов:

$$A(t) = f(A_{22y}(t), A_{11y}(t), A_S(t), A_{27d}(t), A_n(t)),$$

где A_{22y} , A_{11y} , A_S и A_{27d} – части, обусловленные солнечным магнитным циклом, циклом солнечной активности, сезонной вариацией и 27-дневной повторяемостью соответственно; A_n – нерегулярная часть, обусловленная конкретной ситуацией и наиболее недавними событиями. В наиболее простом случае (линейном и аддитивном):

$$A(t) = A_0 + A_{22y}(t_{22y}) + A_{11y}(t_{11y}) + A_S(t_y) + A_{27d}(t_{27d}) + A_n(t),$$

где A_0 – некоторая постоянная часть, t_y – время года, t_{11y} и t_{22y} – фазы 11-летнего и 22-летнего циклов, t_{27d} – фаза цикла, связанного с вращением Солнца (рис. 2).

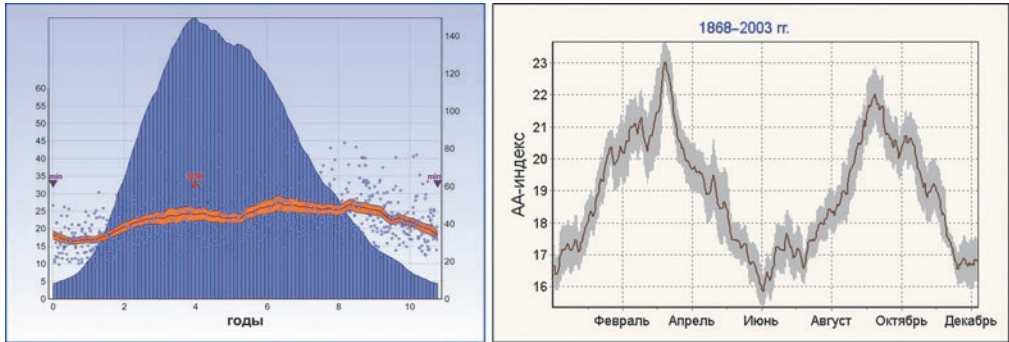


рис. 2. Усредненные за 11–23 циклы солнечной активности индексы солнечной и геомагнитной активности (циклы и сезоны)

Кроме прогнозов, основанных на статистическом анализе временных рядов, сотрудниками ИЗМИРАН и ИСЗФ СО РАН был разработан принципиально новый метод анализа геоэффективности солнечных эрупций, где в качестве входного параметра берутся не информация о форме и скорости коронального выброса в плоскости телескопа, а параметр, характеризующий непосредственно мощность самой эрупции – эруптивный магнитный поток. На основе полученных зависимостей была создана «Ультрафиолетовая/магнитная диагностика геоэффективности солнечных эрупций» [Chertok et al., 2013].

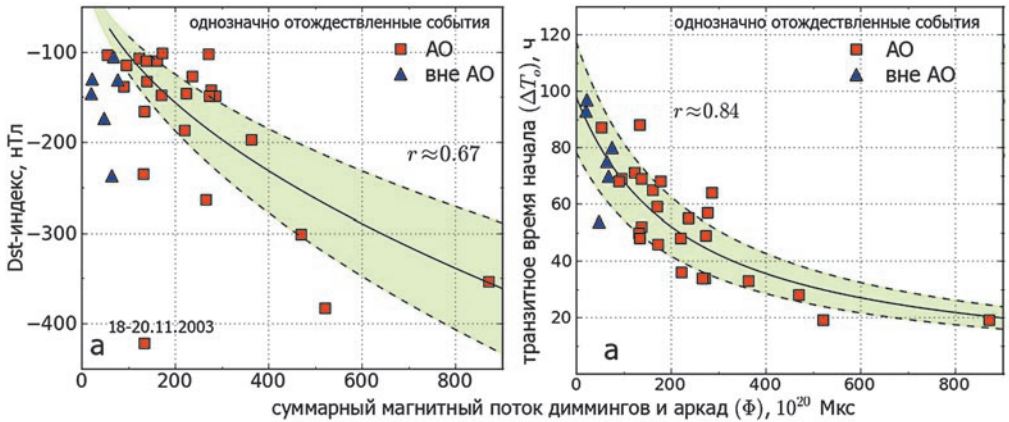


рис. 3. Зависимость Dst индекса (левая панель) и транзитного времени начала бури (правая панель) от эруптивного магнитного потока.

Данная диагностика позволяет заблаговременно оценить максимальную величину Форбуш-понижения, максимальную интенсивность геомагнитной бури (ГМБ) и транзитные времена начала и пика ГМБ от соответствующей эрупции на поверхности Солнца (см. рис. 3).

В настоящее время ЦПКП в ежедневном режиме создает:

- прогнозы солнечной и геомагнитной активности на 3, 8, 55 суток (в отдельности и совместно);

- прогнозы суточного потока (флюенса) электронов с энергией > 2 МэВ на геостационарных орбитах на 28 суток;
- прогнозы вероятности протонного возрастания на 28 дней (прогноз радиационной обстановки);
- обзоры и прогнозы основных параметров КП на 3 дня в табличном виде.

Кроме того, ежемесячно создаются комплексные обзоры и прогнозы КП на следующий месяц (для планирования космических работ), а затем на каждый запуск гражданских КА. В автоматическом режиме создаются предупреждения о резких изменениях (алертах) основных параметров КП и сверхкраткосрочный прогноз геомагнитной активности (Ap и Dst) на 1 и 3 часа. По специальным запросам создаются аналитические обзоры и справки. На рис. 4 и 5 показаны примеры двух прогнозов КП.

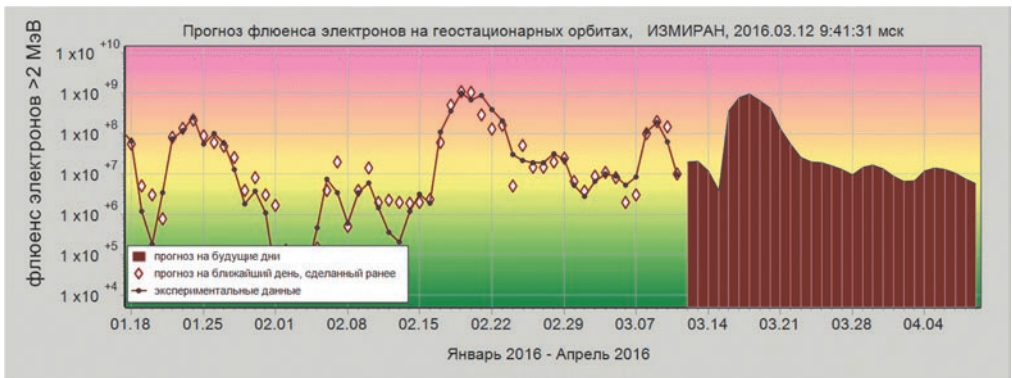


рис. 4. Прогноз суточного потока релятивистских электронов с энергией > 2 МэВ на геостационарных орбитах. В правой части – прогноз на 28 суток, в левой – измеренные значения за прошедшие 55 суток – кривая, наши прогнозы на ближайший день – ромбики.

В ЦПКП большое внимание уделяется вопросам обеспечения необходимой точности создаваемых прогнозов. Верификация производится различными способами. Так в ежедневных прогнозах основных параметров КП на левой панели графика приводится график измеренных значений за 55 суток и ромбиками отмечены прогнозные значения, которые выдавались на каждый ближайший день (см. рис. 4). Это позволяет ежедневно визуально оценить точность прогнозирования. Постоянно проводится корреляционный и дисперсионный анализ наших прогнозов с измеренными значениями на различных временных интервалах, а также при сравнении с результатами других мировых прогностических Центров, работающих в ежедневном формате (рис. 6):

- SWPC – Space Weather Prediction Center (США);
- IPS – the Australian national radio propagation and space weather services (Австралия);
- SIDC – the Solar Influences Data Analysis Center, Belgium.

**ОБЗОР КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ на 14 марта 2016 года
и прогноз на ближайшие 3 дня**
(информация сегмента АСПОС ОКП –ИЗМИРАН)

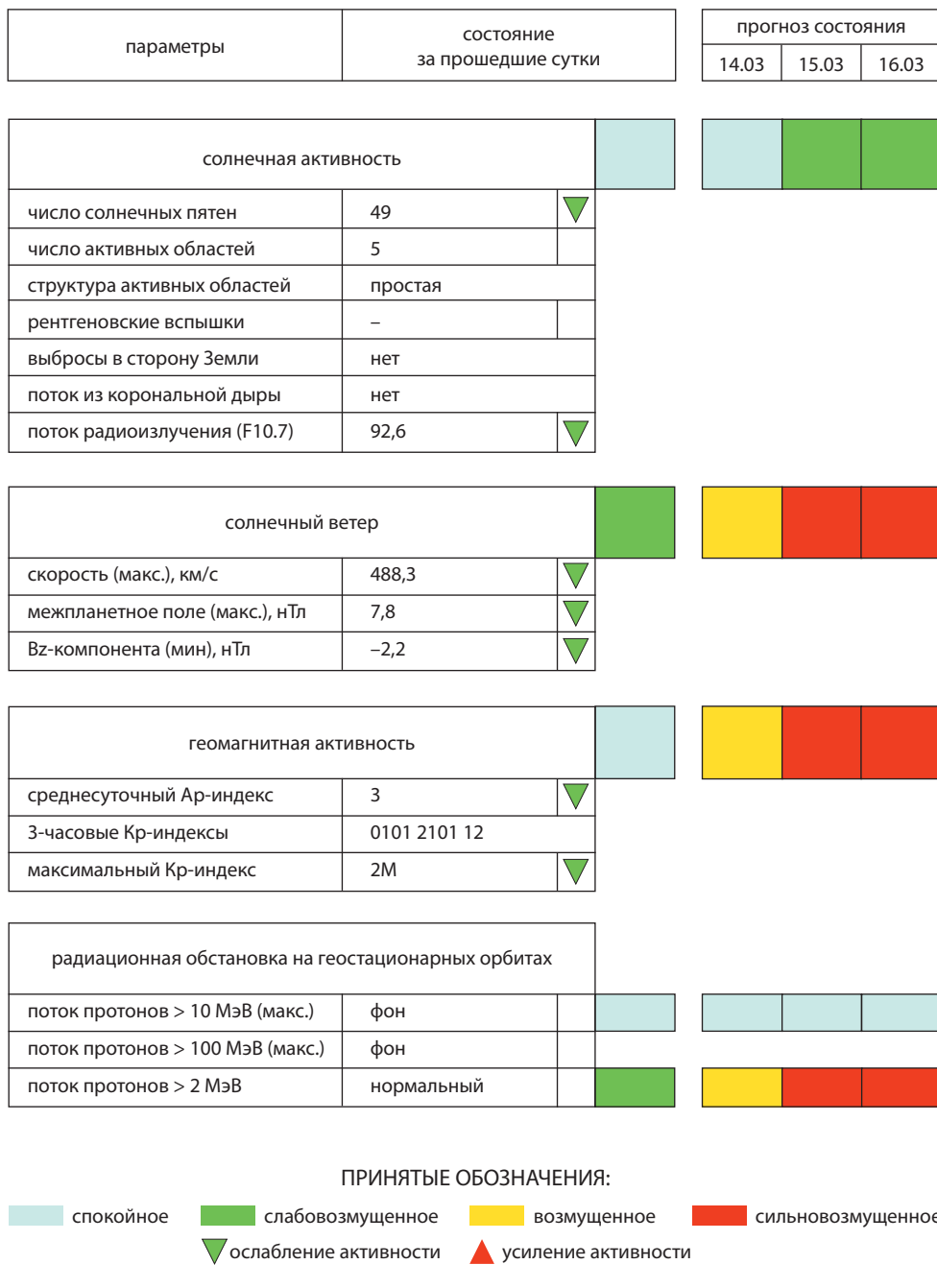


рис. 5. Обзор состояния КП и прогноз на ближайшие 3 дня.

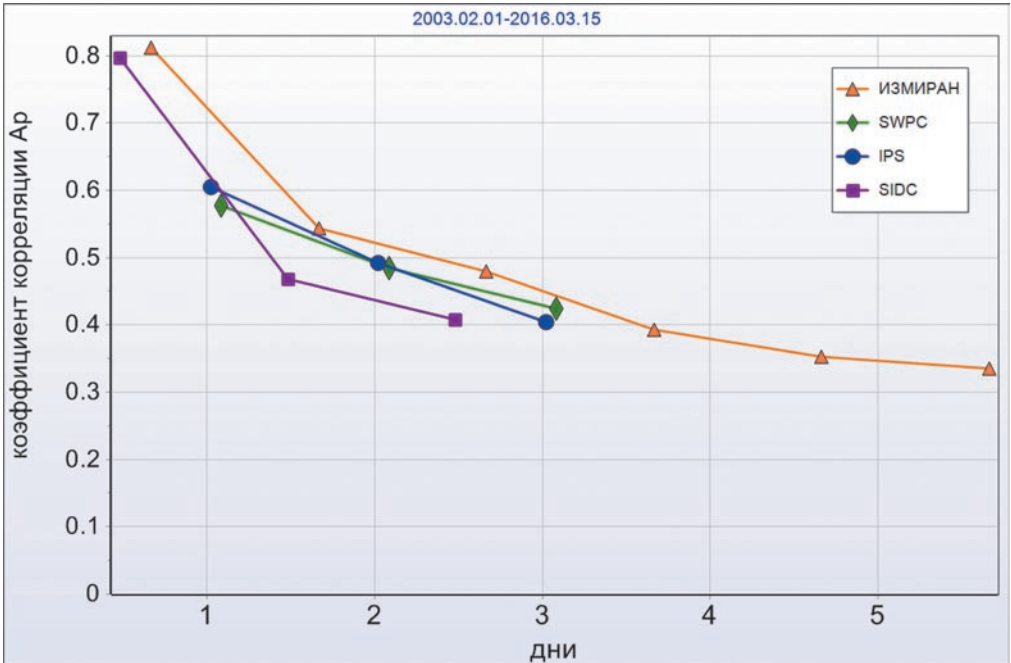


рис. 6. Результаты корреляционного анализа ежедневных прогнозов среднесуточных индексов геомагнитной активности Ap, сделанными мировыми Центрами прогнозов КП в период 2003÷2016 гг. с измеренными значениями этого параметра (для каждого дня упреждения).

СОТРУДНИЧЕСТВО

Создаваемые прогнозы используются различными организациями и учреждениями в сфере науки, экономики и обороны страны. Необходимо выделить многолетнее сотрудничество с одним из головных предприятий Роскосмоса – Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения (ЦНИИмаш), на базе которого создана отраслевая автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП). Основным назначением системы является обеспечение постоянного контроля за космическими объектами, представляющими потенциальную опасность для полетов пилотируемых и других функционирующих КА, выявление, анализ и прогноз развития опасных ситуаций в ОКП (опасные сближения, сходы космических объектов с орбиты и их падение). ЦПКП интегрирован в эту систему на уровне одного из сегментов, обеспечивая ее информацией о текущем состоянии космической погоды и прогнозами на заданные интервалы упреждения (часы, сутки, месяцы, год и годы), которые используются для соответствующих баллистических расчетов космической группировки.

С 1999 года осуществляется тесное сотрудничество с Центром эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры «ЦЭНКИ» (Роскосмос), обеспечивающим все выполняемые в России запуски гражданской космической

техники. Эта структура оперативно обеспечивается комплексными прогнозами космической погоды для учета при планирования космических работ на предстоящий месяц и в работе Государственной комиссии, принимающей решения на вывоз, заправку и пуск техники.

ЦПКП интегрирован в созданную в филиале ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» отраслевую информационно-справочную систему по стойкости электронной компонентной базы к естественным ионизирующим излучениям космического пространства как наземная станция прогнозирования, обеспечивая систему необходимой информацией о состоянии и прогнозах космической погоды.

Благодаря обеспечению ОАО «Газпром – космические системы» надежными прогнозами протонных возрастаний с 2006 года удается парировать сбои в работе систем астронавигации и ориентации группировки телекоммуникационных спутников «Ямал».

В ежедневном режиме на сайте Госкорпорации «Роскосмос» обновляется наша страничка по КП¹.

Ведется работа по применению наших данных в интересах средств ВКС МО РФ.

В рамках международного сотрудничества оказывается научно-методическая помощь в работе лаборатории диагностики и прогноза космической погоды Института ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Национального космического агентства Республики Казахстан и Центра прогнозов космической погоды и космического климата Института космических исследований и технологий Болгарской академии наук. Ведется обмен данными, проводится учеба и стажировка специалистов.

В результате многолетних совместных исследований с учеными Первого Московского государственного университета имени И. М. Сеченова и врачами – кардиологами Щелковской районной больницы удалось разработать способ профилактики воздействия магнитных бурь на больных с ишемической болезнью сердца и гипертонической болезнью и способ его применения. (Патент на изобретение № 2 341 30920, 20.12.2008 [Рапопорт, 2008]). В целях оказания помощи населению в получении необходимой информации о состоянии и прогнозах геомагнитной обстановки в круглосуточном бесплатном режиме работают телефоны-автоответчики².

Используются все возможности, чтобы через центральные, региональные и местные СМИ донести достоверную информацию по КП с целью обеспечить адекватную реакцию населения на ее проявления.

Необходимо четко обозначить большую проблему, требующую безотлагательного разрешения – связанную с острой недостаточностью отечественных информационных ресурсов по КП как наземного, так и космического базирования. Необходимо принять меры по обеспечению информационной безопасности страны в данном направлении.

¹ URL: <http://www.federspace.ru/266/>

² +7 (495) 775-43-57 и +7 (495) 851-19-34

Примером правильного решения комплекса вопросов по КП служат США, где приняты и неукоснительно выполняются документы (National Space Weather Program Implementation Plan¹), в которых отмечается важность вопросов КП для экономики и обороны страны, четко прописаны цели, задачи каждого ведомства и интерфейсы межведомственного обмена. При этом обращает на себя внимание факт широкого привлечения к работам по КП специальных подразделений Министерства обороны США. Результаты таких работ используются в интересах этого ведомства и доступны для гражданских потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЗМИРАН работает Центр прогнозов космической погоды – национальная гелиогеофизическая служба двойного назначения, в которой результаты фундаментальных исследований по проблемам солнечно-земной физики используются для ежедневного прогнозирования различных параметров космической погоды на различные сроки упреждения и для оперативного обеспечения этими прогнозами заинтересованных потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

- [Abunina et al., 2014] *Abunina M., Abunin A., Belov A., Gaidash S., Tassev Y., Velinov P. I.Y., Mateev L., Tonev P.* Properties of Magnetic Fields in Coronal Holes and Geoeffective Disturbances in Solar Cycle 24 // *Comptes rendus de l'Acade'mie bulgare des Sciences*, 2014. V. 67. № 5, P. 699-704.
- [Chertok et al., 2013] *Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A.* Magnetic Flux of EUV Arcade and Dimming Regions as a Relevant Parameter for Early Diagnostics of Solar Eruptions – Sources of Non-recurrent Geomagnetic Storms and Forbush Decreases // *Solar Physics*, 2013. V. 283. I. 2, P. 557-563.
- [Eroshenko et al., 2010] *Eroshenko E.A., Belov A.V., Boteler D., Gaidash S.P., Lobkov S.L., Pirjola R., Trichtchenko L.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // *Advances in Space Research*, 2010. V. 46. № 9. P. 1102-1110.
- [Белов и др., 2004] *Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И., Ерошенко Е.А., Левитин А.Е., Паризи М., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Чиженков В.А., Ючи Н., Янке В.Г.* Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // *Геомagnetизм и аэрономия*, 2004. Т. 44. № 4. С. 502-510.
- [Гайдаш и др., 2012] *Гайдаш С.П., Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А.* Прогнозирование космической погоды. Вторая научная конференция «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований» (ПОЛАР – 2012) 22–26 мая 2012 года, Троицк, ИЗМИРАН.
- [Гайдес, 2005] *Гайдес М.А.* Общая теория систем. (Системы и системный анализ). «Глобус – Пресс», 2005. – 201 с.
- [Зеленый и др, 2015] *Зеленый Л.М., Петрукович А.А.* Арктика. Космическая погода // *Природа*. 2015. № 9. С. 31-39.

¹ URL: <http://www.ofcm.gov>

[Рапопорт, 2008] *Рапопорт С.И., Наумчева Н.Н., Смирнова А.В., Гайдаш С.П., Гуревич М.А.* Средство для профилактики воздействия магнитных бурь на больных с ишемической болезнью сердца и гипертонической болезнью и способ его применения. Патент на изобретение № 2 341 30920, 20.12.2008.

SPACE WEATHER PREDICTION CENTER (IZMIRAN)

S.P. Gaidash, A.V. Belov, A.A. Abunin, M.A. Abunina

Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

In IZMIRAN since 1998 operates the Space Weather Prediction Centre – heliogeophysical service in which results of basic researches on problems of solar and terrestrial physics are practically used for daily forecasting of various parameters of space weather. The paper gives information on this Center and on the main forecasts which it provides for the different interested consumers.

Keywords: space weather, solar-terrestrial physics, solar and geomagnetic activity, radiation hazards, the impact on the system of the earth civilization, forecasting space weather parameters.

Gaidash Sergey Petrovich – the head of the space weather prediction center, IZMIRAN, Ph.D., gaidash@izmiran.ru.

Belov Anatoly Vladimirovich – the head of the laboratory of variations of cosmic rays, IZMIRAN, Ph.D., abelov@izmiran.ru.

Abunin Artem Anatolievich – senior researcher, IZMIRAN, Ph.D., abunin@izmiran.ru.

Abunina Maria Aleksandrovna – researcher, IZMIRAN, abunina@izmiran.ru.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЛЕНТА (ДИСПЛЕЙ) ПО КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ

К.Х. Канониди¹, А.Н. Зайцев¹, В.Г. Петров¹, А.А. Гидеон², С.В. Абрагимов²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк

² ООО «Технопарк Ямал», г. Салехард

Предложено публично распространять информацию по космической погоде с помощью информационных стендов (дисплеев) в виде информационной ленты, обновляемой в реальном времени. Круг потребителей такой информации может быть очень широк, что позволяет повысить уровень информированности общества о реальных свойствах космической погоды и ее влиянии на все современные технологические системы и окружающую среду, включая биосферу Земли. Дальнейшее развитие сервиса по распространению сведений о космической погоде состоит в развитии способов представления информационной ленты в ее мобильном варианте. Наиболее востребованной информации являются сведения о полярных сияниях и магнитных бурях в реальном времени.

Ключевые слова: космическая погода, информационная лента, Солнце, солнечная активность, магнитные бури, полярные сияния.

ВВЕДЕНИЕ

С целью повышения доступности информации по космической погоде для широкой общественности предложено распространять ее публично в виде информационной ленты, обновляемой в реальном времени. Содержание ленты формируется на основе открытых источников космических наблюдений, представленных в сети Интернет. Круг потребителей такой информации может быть очень широк: от всех организаций, использующих современные высокотехнологичные системы навигации, связи, обнаружения, контроля и до предприятий геофизической разведки, предприятий ТЭК (топливно-энергетического комплекса), вплоть до любых организаций просвещения и образования, общественных организаций, радиолюбителей, туристических компаний, организующих туры на Север для наблюдений полярных сияний, и всех тех, кто так или иначе ощущает влияние космической погоды.

Разработка, создание и размещение информационной ленты по космической погоде по нашему мнению поможет осветить и решить ряд простых и актуальных вопросов:

- Космическая погода – что это такое?
- В чем состоит необходимость в мониторинге «космической погоды»? Почему этому стали уделять столь большое внимание?

Канониди Константин Харлампиевич – с.н.с., ИЗМИРАН, kkkh@izmiran.ru.

Зайцев Александр Николаевич – гл.н.с., ИЗМИРАН, д.ф-м.н., alex.zaitsev1940@mail.ru.

Петров Валерий Григорьевич – зав.лаборатории, ИЗМИРАН, к.ф-м.н., vpetrov@izmiran.ru.

Гидеон Александр Александрович – директор «Технопарк Ямал», gideon-aa@tpark89.ru.

Абрагимов Сергей Викторович – зам. директора «Технопарк Ямал», abragimov@gmail.com.

- На что, прежде всего, воздействуют проявления космической погоды? Какие технологические системы страдает больше всего?
- Как космическая погода связана с привычной метеорологией?
- Почему необходима международная кооперация?

Разумеется, распространение сведений о космической погоде в формате информационной ленты, устанавливаемой на больших дисплеях в общественных местах будет способствовать развитию общественного интереса и просвещению. С другой стороны, развитие персональных информационных средств распространения знаний понуждает нас переходить на современные информационные технологии, иначе говоря, переходить на мобильные приложения. В первую очередь это мобильные приложения фирмы Microsoft и мобильные приложения Apple, кроме того имеются ресурсы в российском Яндексе. Одно из самых популярных приложений – информационный сервис о наличии полярных сияний по отдельным регионам, например по Скандинавии. Популярность этого сервиса можно сравнить с популярностью сервиса «пробки» в Москве на Яндексе.

В мире с момента запуска первых спутников сложилась система контроля состояния окружающей среды от уровня Земли до космического пространства. Ведущие страны мира вкладываются в развитие таких систем, которые обеспечивают безопасность и устойчивое развитие экономики. В России имеется своя система контроля, ключевым элементом которой является Центр мониторинга гелиогеофизической обстановки над территорией российской федерации (ЦМГГФО РФ)¹. К сожалению, этот Центр обеспечивает только запросы федеральных министерств и ведомств, ограничиваясь госзаказом и формальным представлением данных, не рассчитанных на массового потребителя. Поэтому большое число пользователей информации по космической погоде используют широкий набор тематических центров космической погоды, созданных в российских исследовательских организациях, которые фактически на вторичной основе представляют в основном данные зарубежных центров.

В настоящее время оперативные прогнозы по космической погоде в реальном времени формируются в Центре прогнозов НОАА в Боулдере, США², затем распространяются по сети из 16 региональных центров прогнозов, объединенных в международную службу «International Space Environment Service (ISES)»³. Далее, на основе этой профессиональной сети центров по космической погоде развивается сеть центров на вторичной основе для конкретных групп пользователей, например SpaceWeather.ru⁴ или Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН⁵.

Основной недостаток профессиональных центров прогноза по космической погоде в России связан с их малой популярностью среди широкой для публики. Если сообщения о метеопрогнозах распространяются непрерывно по телевидению,

¹ URL: <http://space-weather.ru>

² URL: <http://www.swpc.noaa.gov>

³ URL: <http://www.spaceweather.org>

⁴ URL: <http://spaceweather.ru/ru>

⁵ URL: <http://forecast.izmiran.ru>

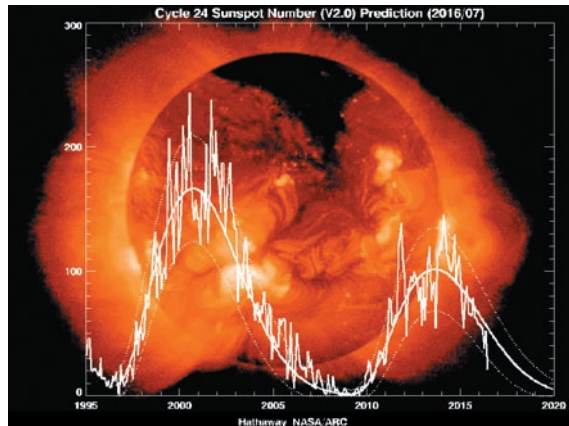
радио, в прессе и в сети интернет, сведения о космической погоде все еще остаются доступными только для ограниченного круга пользователей. Это происходит в первую очередь из-за того, что знания о космической погоде не стали всеобщими.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

При создании информационной ленты по космической погоде нами был сформирован список сайтов, содержание которых представляется наиболее востребованным и полезным для широкой аудитории. С каждого сайта специальная программа с функциями робота проходит по адресу и копирует данные, отражающие текущие сведения по космической погоде и по наблюдениям в космосе. Например, мы берем прогноз полярных сияний для Ямала, выполненный в Лаборатории полярных сияний на Шпицбергене¹. Выбранные кадры информации с пояснениями на русском языке формируют ленту сообщений, которая обновляется с определенным темпом. Можно посмотреть образец² предложенного варианта информационной ленты. Впервые разработанная нами информационная доска³ (дисплей) была выставлена в ИЗМИРАН в рамках конференции ПОЛАР-2012. После конференции лента обновлялась и расширялась и сейчас включает в себя широкий список источников.

В настоящее время лента сообщений по космической погоде состоит из следующих кадров (по каждому кадру указан объект, приведен адрес и сопроводительная надпись).

1. Солнце – изображение в рентгене и график текущего цикла солнечной активности по сайту⁴. *Сопроводительная надпись в кадре:* Ход 24 цикла солнечной активности по числу солнечных пятен, данные представляет Д. Хаттавэй (Dr. David Hathaway), Космический центр им. Маршалла, НАСА.



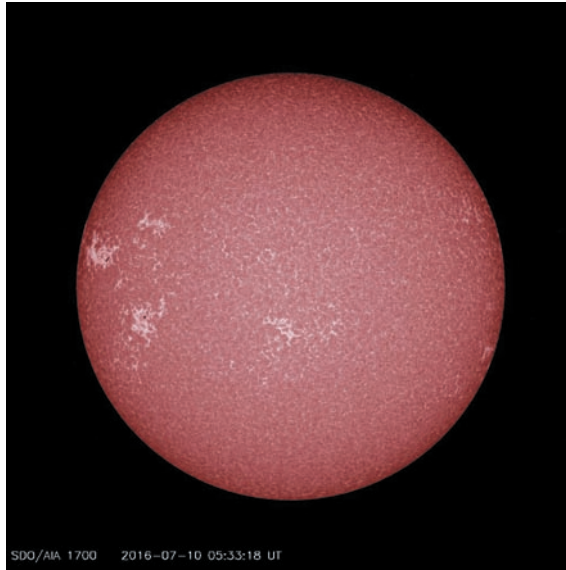
¹ URL: <http://kho.unis.no>

² URL: http://193.232.24.47/Demo_SLD/A_slideshow.htm

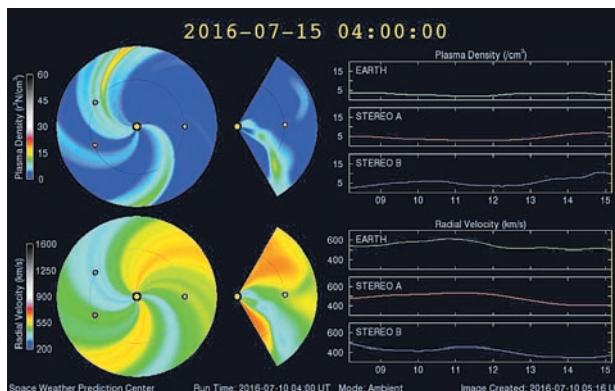
³ URL: <http://www.izmiran.ru/POLAR2012>

⁴ URL: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif

2. Солнце – изображение в видимой части спектра и в рентгене. На экране сразу три изображения Солнца: 1 – в видимом свете, 2 – затем – истечение плазмы, 3 – Солнце в рентгене в трех линиях AIA 211, 193, 171. *Сопроводительная надпись в кадре:* Изображение Солнца в видимом и в рентгеновском спектрах по данным спутника SDO (Solar Dynamic Observatory) = Текущее изображение Солнца в диапазоне (1700 Å)¹.



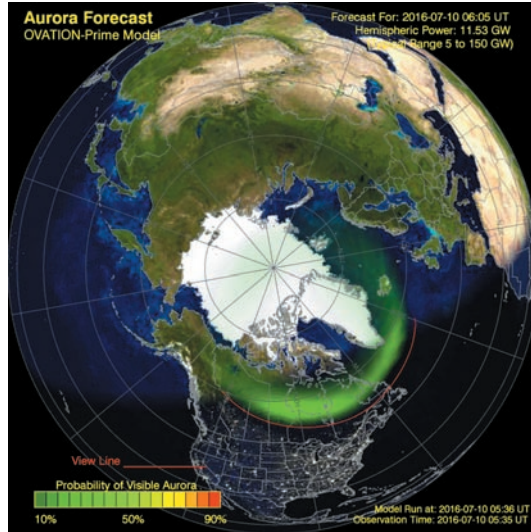
3. Гелиосфера на основе расчетных модельных представлений. *Сопроводительная надпись в кадре:* Гелиосфера – область вокруг Солнца, заполненная солнечной плазмой и межпланетным магнитным полем. Данные WSA-ENLIL Solar Wind Prediction². Видна структура солнечного ветра и направленные к Земле выбросы плазмы, вызывающие магнитные бури.



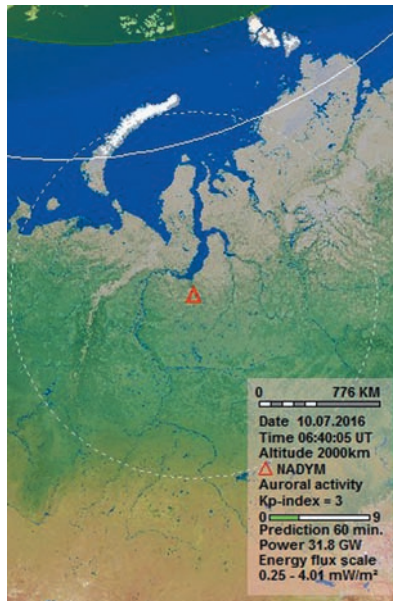
¹ URL: http://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/latest/latest_1024_1700.jpg

² URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction#>

4. Околоземное космическое пространство, вид северного полушария Земли. Овал полярных сияний. *Сопроводительная надпись в кадре:* Овал полярных сияний по модельному расчету (Ovation – Boulder)¹.



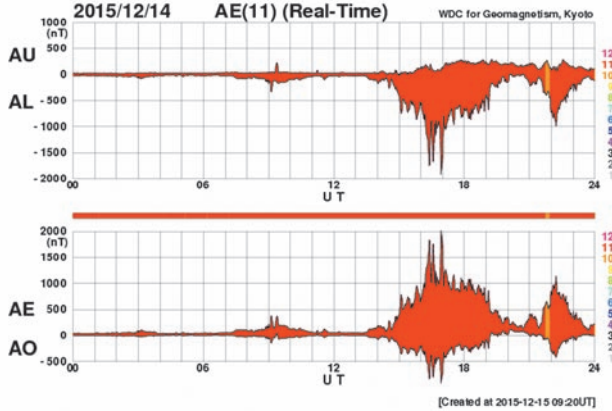
5. Полярные сияния над Ямалом. *Сопроводительная надпись в кадре:* Расчетное положение овала полярных сияний над станцией Надым в реальном времени (по Г. Старкову). Данные лаборатории на Шпицбергене².



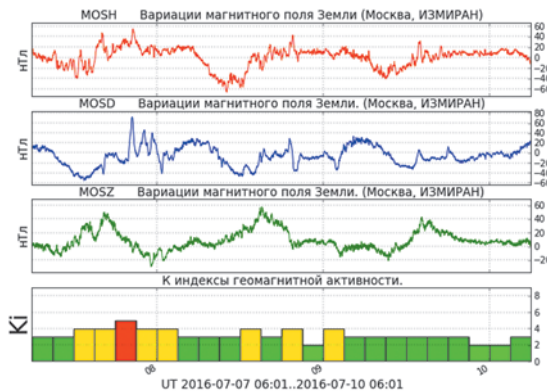
¹ URL: <http://services.swpc.noaa.gov/images/aurora-forecast-northern-hemisphere.png>

² URL: <http://kho.unis.no/Quicklooks/SvalTrackII/nadym.jpg>

6. АЕ-индекс – возмущения магнитного поля Земли в зоне полярных сияний. *Сопроводительная надпись в кадре:* Интегральный индекс геомагнитных возмущений по данным сети 12 обсерваторий в зоне полярных сияний, данные Мирового Центра в Киото, Япония¹.



7. Вариации магнитного поля, обсерватория Москва. *Сопроводительная надпись в кадре:* Вариации магнитного поля и К-индекс магнитной активности по обсерватории Москва, зеленый цвет – поле спокойно, желтый – возмущено, красный – магнитная буря².



8. Вариации магнитного поля в зоне полярных сияний, Ямал. *Сопроводительная надпись в кадре:* Вариации магнитного поля и К-индекс пос. Харасовэй, полуостров Ямал, зона полярных сияний; зеленый цвет – поле спокойно, желтый – возмущено, красный – магнитная буря³.

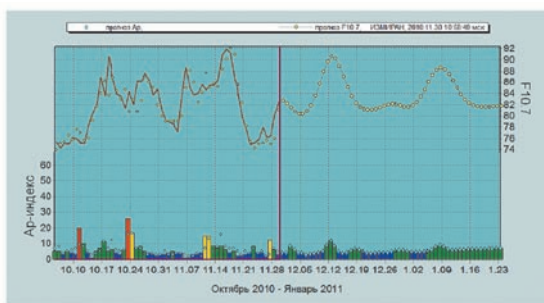
¹ URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/today

² URL: <http://forecast.izmiran.ru/index.php?page=MOS3.ttl>

³ URL: <http://forecast.izmiran.ru/index.php?page=KHS3.ttl>



9. Прогноз солнечной и магнитной активности. *Сопроводительная надпись в кадре:* прогноз солнечной и геомагнитной активности за период 55 дней, создан Центром прогнозов космической погоды ИЗМИРАН¹.



Информация центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН

Предварительный прогноз среднесуточного Ап-индекса геомагнитной активности и потока солнечного радиационного излучения (частота 2800 МГц) на 55 дней.

прогноз выдан 2010.11.30 10:56:49 мск.

первая колонка - номер дня (0-сегодня)

вторая колонка - дата (гггг.мм.дд)

третья колонка - Ап-индекс

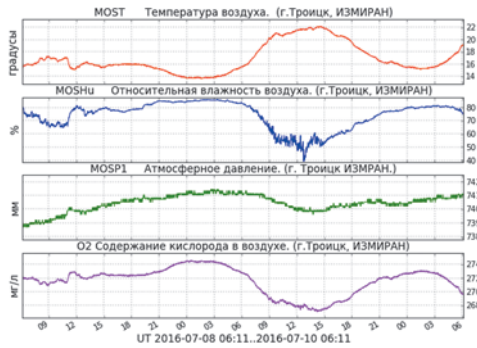
четвертая колонка - Ап-индекс, округлённый до целого числа

пятая колонка - поток солнечного радиационного излучения

0	2010.11.30	4.0	4	82.7
1	2010.12.01	4.0	4	82.3
2	2010.12.02	8.0	8	81.4
3	2010.12.03	6.0	6	80.7
4	2010.12.04	4.0	4	80.3
5	2010.12.05	4.0	4	80.3
6	2010.12.06	2.7	3	80.9
7	2010.12.07	3.2	3	81.9
8	2010.12.08	3.7	4	83.6
9	2010.12.09	4.1	4	85.7
10	2010.12.10	5.0	5	87.9
11	2010.12.11	8.6	9	89.7
12	2010.12.12	11.4	11	90.5
13	2010.12.13	8.9	8	90.2
14	2010.12.14	4.7	5	88.3
15	2010.12.15	3.7	4	87.0
16	2010.12.16	4.3	4	85.1
17	2010.12.17	5.5	6	83.5
18	2010.12.18	6.5	6	82.3
19	2010.12.19	6.0	6	81.6
20	2010.12.20	4.8	5	81.3
21	2010.12.21	4.0	4	81.1
22	2010.12.22	3.6	4	81.1
23	2010.12.23	4.0	4	81.2
24	2010.12.24	4.2	4	81.5

¹ URL: <http://forecast.izmiran.ru/index.php?page=prognoz55.ttl>

10. Состояние атмосферы – метеоданные по обсерватории Москва. *Сопроводительная надпись в кадре*: Метеорологическая обстановка в г. Троицке по данным ИЗМИРАН: ход температуры, давление и осадки¹.



В наших планах стоит работа по совершенствованию информационной ленты, с тем чтобы она пользовалась спросом и служила в качестве первого шага на пути познания для всех, кто интересуется космической погодой. Мы предлагаем размещать эту ленту в школах и других организациях, где имеются большие экраны (дисплеи), и в других организациях, где имеется запас возможностей и ресурсов для демонстрации информации по космической погоде.

В дополнение к ленте мы предлагаем использовать текстовый материал прогнозов ИЗМИРАН в виде бегущей строки. Текущий прогноз космической погоды составляется в ИЗМИРАН каждое утро рабочего дня и рассылается по списку всем заинтересованным организациям, а также выставляется на сайте ИЗМИРАН. Формат прогноза следующий (текущий пример):

«Ежедневный прогноз геомагнитной активности (ИЗМИРАН) на 9:00 часов 20 марта 2016 года, время московское. Прошедшие сутки магнитное поле Земли менялось от слабо возмущенного до возмущенного, в отдельные моменты зарегистрирована кратковременная малая магнитная буря. Ближайшие два дня ожидается повышенная магнитная активность, возможны возмущенные периоды».

Пользуются спросом прогнозы недельной заблаговременности. Текущий пример:

«Информация Центра прогнозов космической погоды (ИЗМИРАН) на 10 часов 9 февраля 2016 г. Солнечная активность 30 января – 8 февраля была, в основном, низкой. Магнитное поле Земли менялось от спокойного до слабовозмущенного. 3 и 8 февраля зарегистрированы малые геомагнитные бури, 7 февраля – отдельные возмущенные периоды.

Ожидается, что 9–18 февраля солнечная активность будет меняться от низкой до умеренной. Вероятны вспышки средней мощности. Ожидаемая геомагнитная обстановка – от спокойной до слабовозмущенной. 9–10, 12 и 16–18 февраля вероятны возмущенные периоды».

¹ URL: <http://forecast.izmiran.ru/index.php?page=weather2.ttl>

Из текста прогнозов следует, что сам прогноз составлен на основе информации планетарного масштаба и привязан к региону Центральной России. Делаются попытки достигнуть детального регионального прогноза по примеру метеопрогнозов. Магнитные возмущения заметно меняются по нескольким зонам: полярная околополюсная, зона полярных сияний, зона средних широт, зона экваториальная. Прогнозы, привязанные к конкретной зоне, еще предстоит доработать. Ввиду того, что регион Ямала представляет собой наиболее активно осваиваемую территорию Арктики, первые попытки региональных прогнозов будут разработаны именно для региона Ямала.

В прогностической работе Центра ИЗМИРАН, кроме собственных методов и баз данных, используются наблюдения спутников GOES, ACE, SDO, космических аппаратов STEREO, материалы американского (NOAA/SWPC), европейского (SIDC) и казахстанского центров космической погоды. Мы благодарны всем учреждениям и исследовательским группам, предоставляющим наблюдения и результаты предварительного анализа в режиме реального (и квазиреального) времени.

Как правило, в каждом космическом эксперименте за рубежом имеется раздел «public outreach and education», где помещаются для публичного распространения результаты конкретного эксперимента в пользу развития общественного интереса в направлении «просвещение и образование». Чтобы привлечь внимание к результатам космических экспериментов имеется большое число специализированных сайтов, посвященных как конкретному эксперименту, так и сайты, обобщающие текущие данные и сведения, в первую очередь по космической погоде.

ПРИМЕР ОПЕРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Оперативные данные по магнитному полю на региональном уровне особенно важны при освоении природных ресурсов Арктики, где все больше и больше сил тратится на исследовательские и геофизические работы. Нами ведется работа по проекту «Полярная геофизика Ямала», в рамках которого воссоздается сеть магнитометров на Ямале. Научные проблемы по проекту обсуждались в ИЗМИРАН в 2011 и 2012 годах на конференциях ПОЛАР-2011¹ и ПОЛАР-2012².

Следующая конференция ПОЛАР-2014³ состоялась в Салехарде, где сотрудники ИЗМИРАН и ИКИ РАН представили идею реализации программы по обучению и просвещению, которая была воспринята и сейчас реализуется в виде сайта виртуальной геофизической лаборатории. Проект «виртуальная геофизическая лаборатория» создан ООО «Технопарк Ямал» совместно с органами власти Ямало-Ненецкого автономного округа и крупными научными институтами Москвы, Санкт-Петербурга и Новосибирска с целью развития геофизических исследований на Ямале, накопления научных данных, освещения значимых событий и открытий в области полярной геофизики в приложениях к Ямалу.

¹ URL: <http://www.izmiran.ru/POLAR2011>

² URL: <http://www.izmiran.ru/POLAR2012>

³ URL: <http://polar2014.yanao.ru>

В настоящее время, на начало 2016 года нами установлены три магнитометра: остров Белый, пос. Харасовэй и город Салехард. В ближайшем будущем нами будут восстановлены магнитометры в поселке Сеяха, на мысе Каменный и в городе Надым. Получаемая информация обрабатывается с целью анализа магнитных возмущений. В качестве примера мы приводим здесь случай наблюдения полярных суббурь 11–13 января 2016 года. Эти данные доступны по сети Интернет, и мы готовы, используя информационную ленту, распространять эти данные среди потенциальных пользователей.

Установленные в 2015 году магнитометры на о. Белый и в пос. Горноknязевск вблизи Салехарда наряду с установленным ранее магнитометром в пос. Харасовэй обеспечивают поступление магнитных данных в реальном времени на сайт ИЗМИРАН¹. Эти данные доступны и используются для анализа геомагнитной возмущенности и магнитного поля Земли. Пример регистрации представлен на рис. 1.

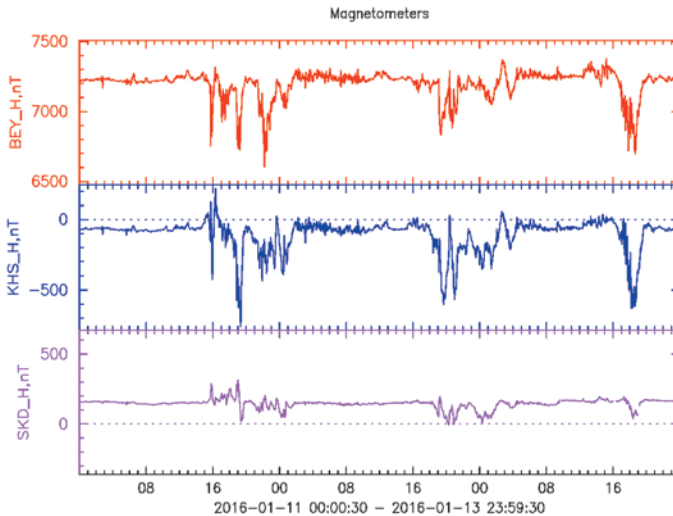


рис. 1. Полярные суббури 11–13 января 2016 года – Белый, Харасовэй, Салехард.

По записям на магнитометрах видно, что в период 11–13 января 2016 года наблюдалось несколько авроральных суббурь. Амплитуда возмущений составила по о. Белый более 500 нТл, по Харасовэю – более 700 нТл, по Салехарду – около 300 нТл. Величина АЕ-индекса достигла величины 700 нТл в тот же момент, что и возмущение по Харасовэю. В целом характер возмущений на Ямале повторяется на всех трех магнитометрах, но в отдельных деталях различия значительны и подтверждают наличие сложной структуры токов, текущих в ионосфере на высотах слоя Е ионосферы (около 100 км). Расстояние Салехард–Харасовэй около 600 км, Харасовэй–Белый – около 300 км. Соответственно, изменчивость токов от точки к точке может составлять по величине 2 раза и более. Эти различия будут прояв-

¹ URL: <http://forecast.izmiran.ru>

ляться в величине индукционных токов на земле, что необходимо учитывать при работе систем, чувствительных к изменениям магнитного поля Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы полагаем, что распространение знаний и данных о космической погоде в формате информационной ленты, устанавливаемой на больших дисплеях в общественных местах, будет способствовать просвещению и расширению числа запросов на такие сведения. Следуют обратить внимание на развитие мобильных приложений. Например, на работу по практическому внедрению сервисов по космической погоде в Европе¹ и ее мобильную версию² на сайте. Накопленный опыт использования мобильных компьютеров (гаджетов) для отображения данных по космической погоде позволяет реализовать наш вариант информационной ленты по космической погоде в мобильном варианте.

Следует обратить внимание, что при наличии большого числа ссылок на ресурсы по космической погоде, необходимо представлять профессиональные сведения в открытом доступе для их использования в публичных сетях. Ввиду большого спроса на прогноз магнитных бурь и полярных сияний, следует вести колонку сообщений в средствах массовой информации с наряду с данными по погоде и гороскопами. Именно общественная активность, ориентированная на просвещение и образование, является актуальной задачей для ученых с тем, чтобы добиться значимой поддержки со стороны государственных структур. Для этого необходимо создание групп активистов по продвижению сведений о космической погоде в общественных сетях. Нам представляется, что в этом направлении определенную роль может сыграть создание и распространение информационной ленты по космической погоде.

Работа над развитием и внедрением информационной ленты проводится как часть проекта «Полярная геофизика Ямала»³. Всем, кто заинтересован в возможном участии в проекте рекомендуем обращаться к к.ф.-м.н. В.Г. Петрову⁴ и д.ф.-м.н. А.Н. Зайцеву⁵. Желаящим установить информационную ленту (дисплей) по космической погоде в своей организации мы готовы оказать содействие и рекомендуем обращаться к К.Х. Канониди⁶.

Ссылки на основные российские ресурсы по космической погоде:

ИКИ РАН – <http://spaceweather.ru/ru>

ИЗМИРАН – <http://forecast.izmiran.ru>

НИИЯФ МГУ – <http://swx.sinp.msu.ru>

¹ URL: <http://www.affects-fp7.eu/>

² URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.affects.forecasts>

³ URL: <http://www.wdcb.ru/polar/>

⁴ E-mail: vpetrov@izmiran.ru

⁵ E-mail: alex.zaitsev1940@mail.ru

⁶ E-mail: kkkh@izmiran.ru

ИПГ – <http://space-weather.ru>
ААНИИ – http://geophys.aari.ru/real_mag.php
ПГИ – <http://apm.pgia.ru>
ИКФИА – <http://www.forshock.ru/cont.html>
ИКИР – <http://www.ikir.ru/ru/About>
ИСЗФ – <http://dep1.iszf.irk.ru>
ФИАН – <http://www.thesis.lebedev.ru>

THE INFORMATION (DISPLAY) OF SPACE WEATHER

K.H. Kanonidi¹, A.N. Zaitsev¹, V.G. Petrov¹, A.A. Gideon², S.V. Abragimov²

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Troitsk, Russia

² Tekhno Park Yamal, Salekhard

We propose to distribute publicly information on space weather using information (display of newslines) updated in real time. The circle of users for such information can be very broad, allowing us to increase the level of awareness about the real features of space weather and its impact on all modern technological systems and the environment, including the biosphere and the man itself on the Earth. The further development of the service for the dissemination of information about space weather is to develop ways of presenting information tray in its mobile version. As the most requested information is the information about the polar auroras and magnetic storms we expect the wide usage of information tray in real time.

Keywords: space weather, the information tray, the Sun, solar activity, magnetic storms, auroras.

Kanonidi Konstantin Kharlampievich – senior scientist, IZMIRAN, kkkh@izmiran.ru.

Zaitsev Alexander Nikolaevich – senior scientist, IZMIRAN, alex.zaitsev1940@mail.ru.

Petrov Valerii Grigorevich – head of laboratory, IZMIRAN, vpetrov@izmiran.ru.

Gideon Alexander Alexandrovich – director, Tekhno Park Yamal, gideon-aa@tpark89.ru.

Abragimov Sergey Viktorovich – expert, Tekhno Park Yamal, abragimov@gmail.com.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГД МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ

А.А. Самсонов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

В работе описано, каким образом магнитогидродинамическое (МГД) моделирование может быть использовано для изучения земной магнитосферы. Указаны как несомненные достоинства МГД моделей, так и их ограничения. Впервые дано описание новой глобальной МГД модели SPB U15. Рассмотрены примеры использования МГД моделей для предсказания: глобальных магнитосферных параметров, временных вариаций в магнитосфере в отдельных событиях, магнитосферно-ионосферных токов и наземных вариаций. В заключение кратко отмечены дальнейшие перспективы развития МГД моделей.

Ключевые слова: магнитосфера, ионосфера, солнечный ветер, магнитное поле, численное моделирование, магнитные бури.

1. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МГД МОДЕЛЕЙ

1.1. Область исследования

Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем земного диполя приводит к формированию магнитосферы. Поскольку поток солнечного ветра сверхзвуковой, то в соответствии с законами гидродинамики перед обтекаемым препятствием (магнитосферой) образуется отошедшая ударная волна. Внешней границей земного магнитного поля является магнитопауза, а между магнитопаузой и отошедшей ударной волной находится магнитослой. В подсолнечной области расстояние между магнитопаузой и Землей относительно небольшое и составляет в спокойных условиях при типичном солнечном ветре около 11 земных радиусов (R_E). На ночной стороне магнитосферы образуется вытянутый хвост, размер которого может превышать $200 R_E$. Передача энергии солнечного ветра в магнитосферу, как полагают, происходит в основном за счет магнитного пересоединения на магнитопаузе.

Хотя плазма солнечного ветра является практически бесстолкновительной, тем не менее, многие явления в солнечном ветре хорошо описываются уравнениями магнитной гидродинамики (МГД). В частности, численные МГД модели хорошо воспроизводят структуру магнитосферы (в т.ч. формирование отошедшей ударной волны, магнитопаузы, хвоста магнитосферы). На рис. 1 приведены результаты численных расчетов по глобальной МГД модели BATSRUS (SWMF). Глобальная численная модель является трехмерной, а на рисунке показана скорость течения плазмы и силовые линии магнитного поля в плоскости полуденного меридиана ($y=0$). На границе втекания (справа) в вычислительную область

проникает сверхзвуковой поток солнечного ветра со скоростью 400 км/с (скорость и другие граничные условия не меняются во времени), направленный вдоль линии Солнце–Земля (ось x). При переходе через отошедшую ударную волну скорость потока уменьшается, а направление отклоняется от оси x . Вблизи магнитопаузы в подсолнечной области находится застойная точка, где величина скорости падает почти до нуля.

Толстая белая линия показывает границу между открытыми и замкнутыми магнитными силовыми линиями. В области замкнутых силовых линий скорость плазмы относительно небольшая. А наибольшие скорости ($V > 500$ км/с) модель предсказывает в нейтральном слое хвоста. Такие скорости возникают за счет магнитного пересоединения в хвосте.

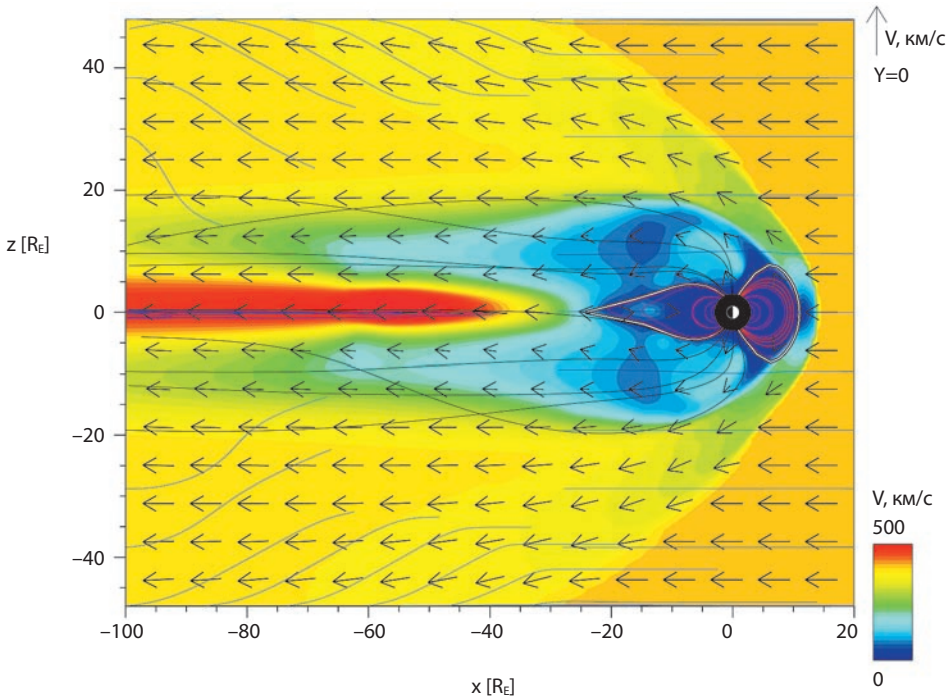


рис. 1. Скорость течения и силовые линии магнитного поля в плоскости $y=0$.
Условия в солнечном ветре: $n = 5 \text{ cm}^{-3}$, $V_x = -400 \text{ km/s}$, $T = 2 \times 10^5 \text{ K}$, $B_y = -B_x = 3,5 \text{ nT}$.

Поверхность на расстоянии $R \approx 3R_E$ от центра Земли обычно является внутренней границей магнитосферной части глобальной модели. В этой области магнитосферный блок стыкуется с ионосферным блоком. Из магнитосферной модели в ионосферу передаются значения продольных токов, а из решения ионосферной модели получают скорости конвекции, определяющие тангенциальную скорость на внутренней границе магнитосферного блока.

1.2. Система уравнений магнитной гидродинамики и методы ее решения

Одножидкостные бездиссипативные уравнения МГД имеют вид:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times [\vec{V} \times \vec{B}], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{V}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) = -\left(\rho \vec{V} \vec{V} + I \left(p + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \frac{\vec{B} \vec{B}}{4\pi} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q}, \quad e = \frac{\rho V^2}{2} + \frac{B^2}{8\pi} + \frac{p}{\gamma - 1}, \quad (4)$$

$$\vec{q} = \vec{V} \left(\frac{\rho V^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \right) + \frac{1}{4\pi} [\vec{B} \times [\vec{V} \times \vec{B}]], \quad \gamma = 5/3.$$

Хотя в выводе косвенно использовано уравнение $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, но при численном решении это уравнение учитывается отдельно или путем добавления источника в исходную систему уравнений [Powell et al., 1999] или с помощью «очистки» дивергенции магнитного поля по проекционной схеме [Brackbill and Barnes, 1980].

Подробное описание методов численного решения уравнений МГД можно найти в книге Куликовского [Куликовский и др., 2012]. Для решения подобной системы уравнений используются как методы с выделением разрывов, так и методы сквозного счета, в которых разрывы заменяются тонкими областями резкого изменения решения. Для нестационарных задач взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой преимущественно используется вторая группа методов. В настоящее время широко используются TVD схемы (total variation diminishing). Требованием TVD схем является условие невозрастания полной вариации численного решения, которое достигается за счет работы специальных ограничителей (см. также [Tóth and Odstrčil, 1996]).

1.3. Ионосферный блок

Продольные токи, рассчитанные на внутренней границе магнитосферной области, вдоль дипольных магнитных силовых линий проецируются на высоту ионосферы. В ионосферном блоке глобальных моделей обычно решается двумерная задача на поверхности сферы (точнее рассматриваются северный и южный сферические сегменты). Рассчитывается уравнение $\nabla \cdot \Sigma \cdot \nabla \Phi = -j_{\parallel} \sin I$, где Σ – это заданный тензор ионосферной проводимости, который обычно включает в себя педерсеновскую и холловскую проводимости, Φ – это искомым электростатический потенциал, j_{\parallel} – заданная величина продольных токов и I – наклонение магнитного поля. Полученный электростатический потенциал проецируется в магнитосферу, где на внутренней границе находится напряженность электрического поля, а затем из напряженности находится скорость конвекции.

На рис. 2 приведено распределение потенциала в северной и южной полусферах для того же самого квази-стационарного решения, что и на рис. 1. Асимметрия между северным и южным полушариями связана с тем, что ММП в среднем направлено вдоль паркеровской спирали.

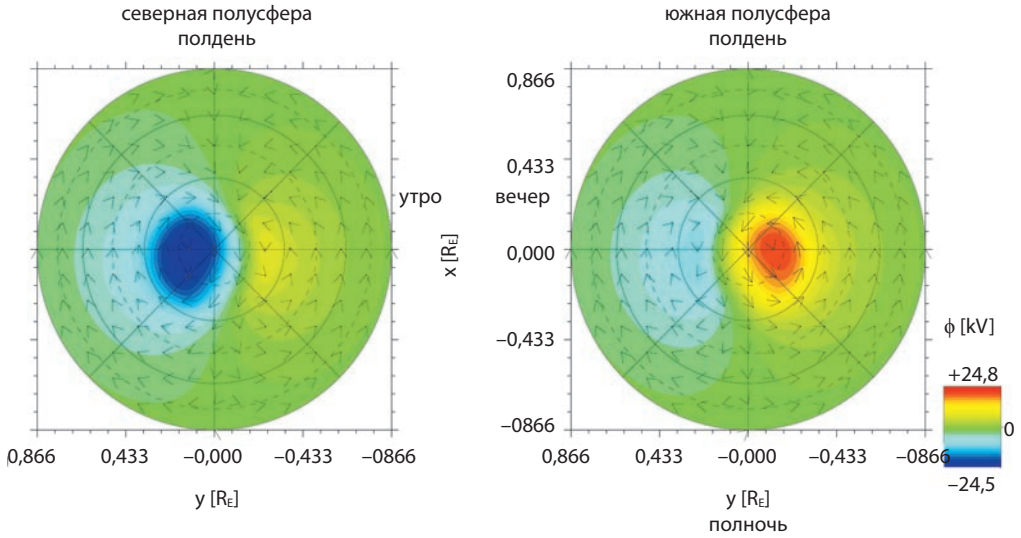


рис. 2. Распределение электрического потенциала в северной и южной полусферах.

1.4. Ограничения МГД подхода

Ограничения МГД подхода в наибольшей степени проявляются при моделировании внутренней магнитосферы. В частности, одножидкостная МГД не разделяет движение частиц разных типов (например, электронов и ионов), поэтому она не способна описывать дрейфовую физику и, соответственно, не предсказывает формирование кольцевого тока. Для описания кольцевого тока глобальные МГД (ГМГД) модели во внутренней магнитосфере стыкуют с многожидкостными моделями, надлежащим образом учитывающими дрейф частиц разного знака.

Уравнения МГД получаются из кинетических уравнений в предположении, что функция распределения по скоростям является максвелловской. Хотя такое предположение в солнечном ветре и в магнитосфере может не выполняться, однако нет оснований полагать, что эффект от немаксвелловского распределения (обычно отличающегося более высокоэнергичными хвостами) будет значительным. Это подтверждает, например, то, что уравнения МГД хорошо описывают взаимодействие межпланетных разрывов с отошедшей ударной волной.

В МГД приближении также не учитывается возникновение и взаимодействие с частицами волн, не относящихся к МГД волнам. Эффект от взаимодействия частиц и волн, по-видимому, в большей степени проявляется во внутренней магнитосфере.

Наконец, последним важным ограничением МГД подхода является наличие численной диссипации. Хотя решаются (в большинстве глобальных моделей) идеальные МГД уравнения, любое численное решение содержит численную вязкость. В случае магнитного пересоединения численная диссипация играет роль физического сопротивления, наличие которого собственно и приводит к развитию пересоединения. Численная вязкость при этом не является постоянной и зависит

от локального разрешения сетки (увеличение разрешения приводит к уменьшению численной вязкости). Таким образом, описание магнитного пересоединения в численной МГД модели является приближенным. Вместе с тем, сравнение результатов численного кинетического и МГД моделирования показывает, что МГД модели способны качественно и даже количественно воспроизводить крупномасштабные особенности динамики пересоединения, получаемые в кинетике.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ SPBU15

В качестве основы при создании новой глобальной магнитосферной модели была использована анизотропная МГД модель магнитослоя [Samsonov et al., 2007, 2012]. Анизотропная МГД модель отличается от изотропной модели, описанной выше, тем, что тепловое давление имеет две компоненты, p_{\perp} и p_{\parallel} , перпендикулярную и параллельную магнитному полю. Учет температурной анизотропии ионов позволяет точнее описывать параметры в магнитослое и во внешней части магнитосферы.

В новой ГМГД модели, которой мы дали рабочее название SPBU15, находится решение трехмерной системы МГД уравнений в консервативной форме в декартовых координатах. Модель использует ТВД схему Лакса–Фридрихса 2-го порядка точности. Рассматривается взаимодействие сверхзвукового потока солнечного ветра с геодиполем. Область моделирования находится в интервале от -30 до $+20 R_E$ по x , и от -40 до $+40 R_E$ по y и z . Вблизи Земли (на радиальном расстоянии $R < 5 R_E$, где в нашем случае находится внутренняя граница) ставятся условия $\vec{V}=0$ и $\vec{B}_1=0$, где \vec{B}_1 – это магнитное поле за вычетом поля диполя.

Рис. 3 показывает величину и направление скорости потока в плоскости полуденного меридиана для таких же условий в солнечном ветре, как и на рис. 1. Модель воспроизводит основные особенности конфигурации магнитосферы: формирование отошедшей ударной волны, магнитопаузы и токового слоя хвоста. В данной версии модели отсутствует блок ионосферы, однако, в дальнейшем, этот блок будет добавлен.

3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МГД МОДЕЛЕЙ

3.1. Предсказание положения магнитопаузы

Положение магнитопаузы можно определить из результатов ГМГД моделирования, получить из предсказаний эмпирических моделей или рассчитать из условия баланса давлений. В целом, разные методы дают сходные результаты, хотя возможны расхождения порядка $1 R_E$, а в каких-то случаях и больше. Все три подхода имеют свои ограничения. Например, практически все эмпирические модели магнитопаузы предполагают, что форма магнитопаузы может описываться какой-то аналитической функцией с несколькими свободными параметрами. Ограничения МГД моделей связаны, в первую очередь, с отсутствием самосоглазованного кольцевого тока, что приводит к небольшому занижению (на $0,5-1 R_E$) расстояния до магнитопаузы.

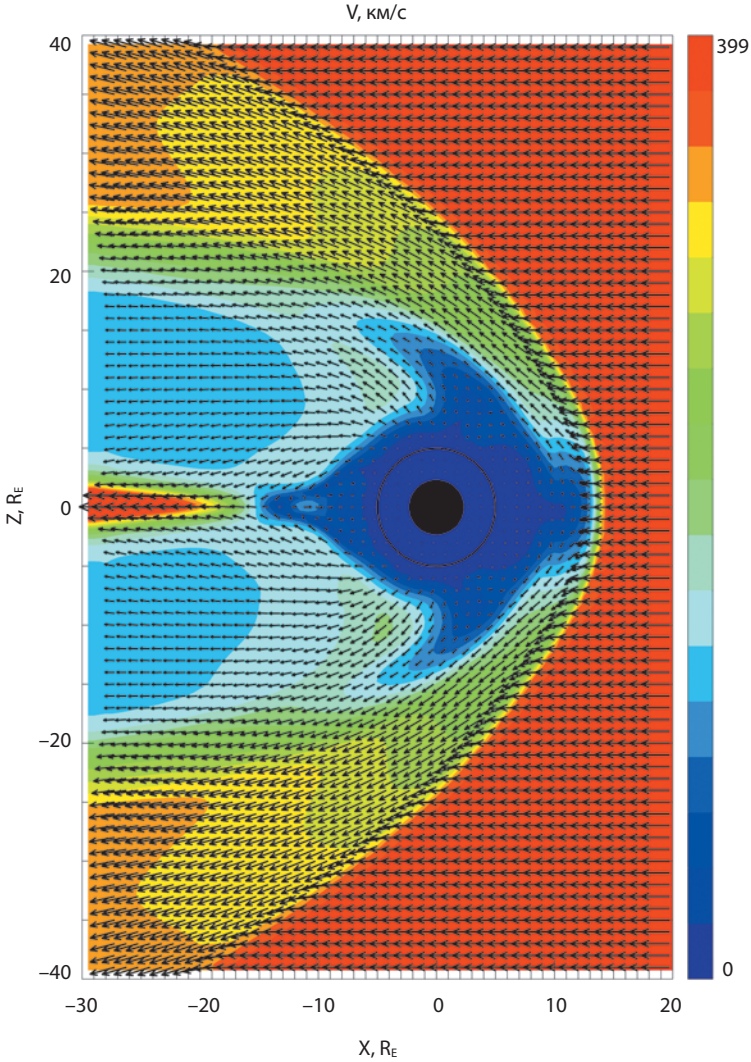


рис. 3. Величина и направление скорости потока в плоскости полуденного меридиана в квазистационарном решении в модели SPBU15.

Рис. 4 показывает положение магнитопаузы в плоскостях $z=0$ и $y=0$ GSM координат, полученное в эмпирических моделях S98 [Shue et al., 1998] и W13 [Wang et al., 2013], а также в ГМГД моделях Space Weather Modeling Framework (SWMF) [Tóth et al., 2005], LFM [Lyon et al., 2004] и SPBU15. Видно, что наибольшие отличия от предсказаний большинства моделей возникают у модели W13 вблизи экваториальной плоскости (данная эмпирическая модель предсказывает на $1,5-2 R_E$ большее подсолнечное расстояние), а также у эмпирической модели S98, которая будучи осесимметричной не предсказывает углубления магнитосферы в области каспов.

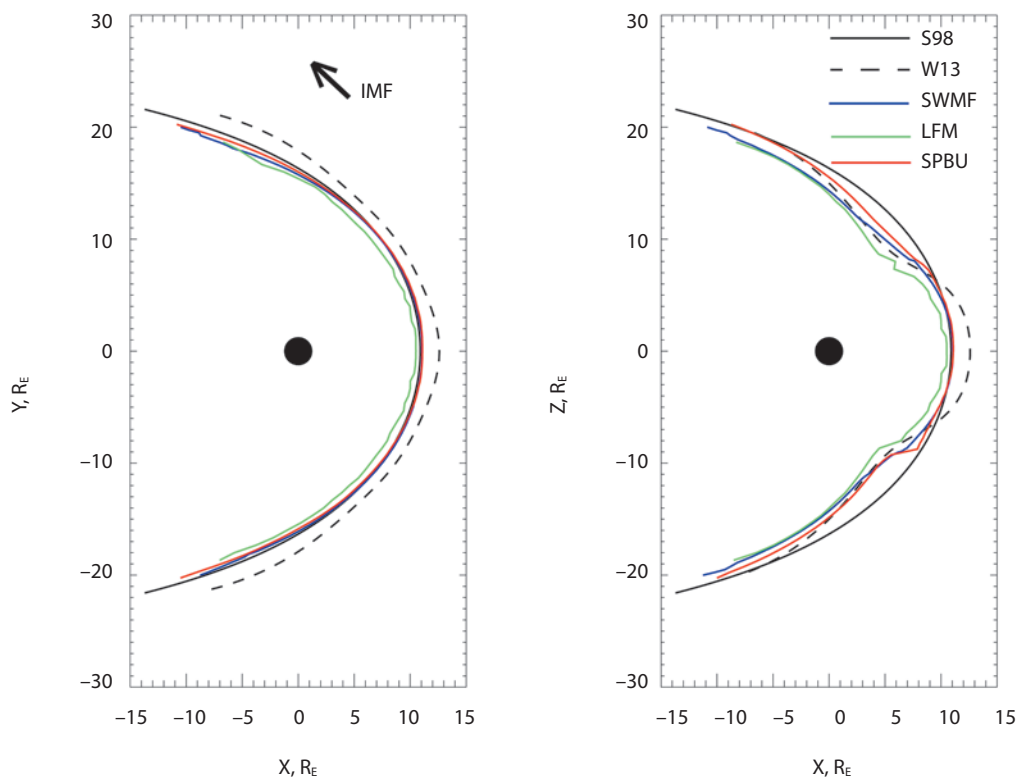


рис. 4. Положение магнитопаузы в плоскостях $z=0$ и $y=0$ в эмпирических моделях S98 и W13, а также в ГМГД моделях SWMF, LFM и SPBU15.

3.2. Временные вариации в магнитосфере

Существует два принципиальных подхода для валидации численных моделей: сравнение с результатами эмпирических моделей и сравнение с данными наблюдений в отдельных событиях. Каждый из этих подходов имеет свои достоинства и недостатки. Эмпирические модели, как правило, построены на большой статистике наблюдений, но вместе с тем (как видно на эмпирических моделях магнитопаузы) в таких моделях могут существовать систематические ошибки или отклонения от данных наблюдений. Сравнение с отдельными событиями (так называемое *case studies*) часто не дает полной картины, в том случае если решение сильно пространственно неоднородно. Таким образом, совпадение или несовпадение данных с результатами моделирования может носить случайный характер. Поэтому наиболее полная валидация должна включать как сравнение с эмпирическими моделями, так и воспроизведение отдельных событий.

Рассмотрим пару примеров воспроизведения спутниковых данных в магнитосфере с помощью ГМГД моделей. [Samsonov et al., 2011] промоделировали воздействие на магнитосферу межпланетной ударной волны с помощью трех ГМГД моделей (BATS-R-US, LFM и OpenGGCM) и сравнили результаты расчетов со

спутниковыми данными в районе дневной магнитосферы, на геостационарной орбите и на утреннем фланге магнитосферы. ГМГД модели с хорошей точностью воспроизвели скачки магнитного поля, связанные с внезапным импульсом (волной сжатия) в магнитосфере, а также наблюдаемые крупномасштабные вариации (вихри) на утреннем фланге. Вместе с тем, ГМГД модели, как правило, не могут воспроизводить мелкомасштабные вариации. Из-за отсутствия в моделях кольцевого тока и возможно из-за расхождений в величине других магнитосферных токов средняя величина магнитного поля на геостационарной орбите в рассмотренном событии отличалась от данных на 10–30 нТ (в зависимости от использованной модели).

В работе [Raeder et al., 2001] приведены сравнения численных результатов с данными спутниковых наблюдений в среднем и ближнем хвосте, с параметрами полярной шапки и с данными наземных станций в высоких широтах во время суббури. В целом, модель предсказывает качественно и количественно наблюдаемые изменения, как в магнитосфере, так и в наземных данных. Вместе с тем, степень согласия результатов моделирования с данными меняется в зависимости от точки наблюдения и момента времени в течение суббури. Таким образом, хотя модель воспроизводит похожую динамику процесса, но имеется ряд несовпадений. В работе [Wiltberger et al., 2015] с помощью ГМГД модели с высоким пространственным разрешением была промоделирована суббуря, во время которой в расчетах возникали высокоскоростные потоки плазмы (Bursty Bulk Flows или BBF), свойства которых хорошо соответствовали наблюдаемым.

3.3. Сравнение с эмпирическими моделями

Валидацию ГМГД моделей можно также проводить путем сравнения с результатами эмпирических моделей. В работе [Gordeev et al., 2015] были использованы результаты четырех ГМГД моделей (BATS-R-US, LFM, OpenGGCM, GUMICS), полученных благодаря общедоступному сервису на сайте Community Coordinated Modeling Center¹, которые сравнивались с результатами моделей магнитопаузы, плазменного давления и магнитного потока в хвосте, с моделями потенциала поперек полярной шапки и с моделью полного продольного тока. Авторы показали, что большинство глобальных магнитосферных параметров достаточно хорошо воспроизводятся ГМГД моделями (например, коэффициенты корреляции между модельными и эмпирическими значениями для большинства моделей составляли 0,8–0,9).

3.4. Моделирование магнитосферно-ионосферных токов

Численное моделирование магнитосферно-ионосферных (МИ) токов не является простой задачей, так требует, с одной стороны, высокого пространственного разрешения в магнитосферной области вблизи внутренней границы, а, с дру-

¹ <http://ccmc.gsfc.nasa.gov>

гой стороны, хорошего задания ионосферной проводимости, величина которой не может быть получена из прямых измерений. Тем не менее, в ряде работ говорится о достаточно хорошем соответствии между результатами моделирования и данными наблюдений в ионосфере.

В частности, [Merkin et al., 2013] сравнил результаты модели LFM с высоким пространственным разрешением с данными по продольным токам, полученными по проекту AMPERE (продольные токи восстановлены по измерениям магнитного поля на низковысотных спутниках Iridium). Авторы пришли к выводу, что результаты моделирования хорошо согласуются с наблюдениями и, более того, позволяют восстановить тонкую структуру продольных токов вплоть до масштабов ~ 100 км.

3.5. Предсказание наземных вариаций магнитного поля

Наземные вариации магнитного поля в авроральной зоне могут быть приближенно рассчитаны из тороидальных (эквивалентных) ионосферных токов [Raeder et al., 2001]. Более точное решение должно учитывать все токовые системы, как в ионосфере, так и в магнитосфере, а также продольные токи [Rastätter et al., 2014]. Магнитное поле рассчитывается из плотности тока по закону Био-Савара.

Сравнение результатов ГМГД моделирования с наземными наблюдениями и результатами эмпирических моделей Ваймера и Вайгеля для нескольких событий с сильной геомагнитной активностью (магнитных бурь) приведены в работе [Pulkkinen et al., 2011]. Авторы делают вывод, что в настоящее время, сравнивая друг с другом предсказания ГМГД и эмпирические модели, нельзя выделить абсолютного лидера по точности прогнозов. Часто наиболее точный прогноз по наземным данным можно сделать, если использовать средние значения по набору моделей.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящее время только ГМГД модели позволяют описывать трехмерную глобальную конфигурацию магнитосферы, т. е. самосогласованно определять положения разных магнитосферных границ и рассчитывать плазменные параметры и магнитное поле. Однако классические МГД модели не могут полностью воспроизвести всю магнитосферную физику, главным образом потому, что магнитосферная плазма состоит из частиц разной массы и разного заряда. Развитие магнитосферного моделирования, по-видимому, будет идти в направлении объединения разных моделей для разных областей пространства, в соответствии с тем, какие физические процессы в данной области являются определяющими. В частности, в настоящее время делаются попытки стыковать МГД модели с кинетическими моделями частиц в ячейках (PIC codes) в области магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы [Daldorff et al., 2014].

ЛИТЕРАТУРА

- [Куликовский и др., 2012] *Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю.* Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений // 2-е изд. М.: Физматлит. 2012. 656 с.
- [Brackbill and Barnes, 1980] *Brackbill J.U., Barnes D.C.* The effect of nonzero $\nabla \cdot \mathbf{B}$ on the numerical solution of the magnetohydrodynamic equations // *J. Comput. Phys.* 1980. T. 35. P. 426-430. DOI: 10.1016/0021-9991(80)90079-0.
- [Daldorff et al., 2014] *Daldorff L.K.S., Tóth G., Gombosi T.I., Lapenta G., Amaya J., Markidis S., Brackbill J.U.* Two-way coupling of a global Hall magnetohydrodynamics model with a local implicit particle-in-cell model // *J. Comput. Phys.* 2014. T. 268. P. 236-254. DOI: 10.1016/j.jcp.2014.03.009.
- [Gordeev et al., 2015] *Gordeev E. et al.* Assessing the performance of community-available global MHD models using key system parameters and empirical relationships // *Space Weather.* 2015. T. 13. P. 868-884. DOI:10.1002/2015SW001307.
- [Lyon et al., 2004] *Lyon J.G., Fedder J.A., Mobarrry C.M.* The Lyon-Fedder-Mobarrry (LFM) global MHD magnetospheric simulation code // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004. T. 66. P. 1333-1350. DOI: 10.1016/j.jastp.2004.03.020.
- [Merkin et al., 2013] *Merkin V.G., Anderson B.J., Lyon J.G., Korth H., Wiltberger M., Motoba T.* Global evolution of Birkeland currents on 10 min timescales: MHD simulations and observations // *J. Geophys. Res.* 2013. T. 118. P. 4977-4997. DOI: 10.1002/jgra.50466.
- [Powell et al., 1999] *Powell K.G., Roe P.L., Linde T.J., Gombosi T.I., de Zeeuw D.L.* A solution-adaptive upwind scheme for Ideal magnetohydrodynamics // *J. Comp. Phys.* 1999. T. 154. P. 284-309. DOI: 10.1006/jcph.1999.6299.
- [Pulkkinen et al., 2011] *Pulkkinen A. et al.* Geospace Environment Modeling 2008–2009 Challenge: Ground magnetic field perturbations // *Space Weather.* 2011. T. 9. S02004. DOI: 10.1029/2010SW000600.
- [Raeder et al., 2001] *Raeder J. et al.* Global simulation of the Geospace Environment Modeling substorm challenge event // *J. Geophys. Res.* 2001. T. 106. P. 381-395, DOI: 10.1029/2000JA000605.
- [Rastätter et al., 2014] *Rastätter L., Tóth G., Kuznetsova M.M., Pulkkinen A.A.* CalcDeltaB: An efficient postprocessing tool to calculate ground-level magnetic perturbations from global magnetosphere simulations // *Space Weather.* 2014. T. 12. P. 553-565. DOI: 10.1002/2014SW001083.
- [Samsonov et al., 2007] *Samsonov A.A., Alexandrova O., Lacombe C., Maksimovic M., Gary S.P.* Proton temperature anisotropy in the magnetosheath: comparison of 3-D MHD modelling with Cluster data // *Ann. Geophys.* 2007. T. 25. P. 1157-1173. DOI: 10.5194/angeo-25-1157-724.
- [Samsonov et al., 2011] *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Zolotova N.V. et al.* Propagation of a sudden impulse through the magnetosphere initiating magnetospheric Pc5 pulsations // *J. Geophys. Res.* 2011. T. 116. A10216. DOI: 10.1029/2011JA016706.
- [Samsonov et al., 2012] *Samsonov A.A., Němeček Z., Šafránková J., Jelínek K.* Why does the subsolar magnetopause move sunward for radial interplanetary magnetic field? // *J. Geophys. Res.* 2012. T. 117. A05221. DOI: 10.1029/2011JA017429.
- [Shue et al., 1998] *Shue J.-H. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. T. 103. P. 17691-17700. DOI: 10.1029/98JA01103.
- [Tóth and Odstrčil, 1996]

- [Tóth and Odstrčil, 1996] *Tóth G., Odstrčil D.* Comparison of some flux corrected transport and total variation diminishing numerical schemes for hydrodynamic and magnetohydrodynamic problems // *J. Comput. Phys.* 1996. T. 128. P. 82-100.
- [Tóth et al., 2005] *Tóth G. et al.* Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community // *J. Geophys. Res.* 2005. T. 110, A12226, DOI: 10.1029/2005JA011126.
- [Wang et al., 2013] *Wang Y. et al.* A new three-dimensional magnetopause model with a support vector regression machine and a large database of multiple spacecraft observations // *J. Geophys. Res.* 2013. T. 118, P. 2173-2184. DOI: 10.1002/jgra.50226.
- [Wiltberger et al., 2015] *Wiltberger M., Merkin V., Lyon J. G., Ohtani S.* High-resolution global magnetohydrodynamic simulation of bursty bulk flows // *J. Geophys. Res.* 2015. T. 120, DOI: 10.1002/2015JA021080.

STUDY OF SOLAR WIND – MAGNETOSPHERE INTERACTION USING MHD MODELS

A.A. Samsonov

Saint-Petersburg State University

The paper discusses applications of magnetohydrodynamic (MHD) models to study the Earth's magnetosphere. We list both advantages and disadvantages of MHD models. In first time, we present a new global MHD code SPBU15. We show examples of MHD model applications to predict: global magnetospheric parameters, temporal variations in the magnetosphere in case studies, magnetospheric-ionospheric currents, and ground magnetic variations. We briefly summarize with future prospects of MHD model development.

Keywords: magnetosphere, ionosphere, solar wind, magnetic field, numerical modeling, magnetic storms.

Samsonov Andrey Aleksandrovich – senior scientist, Dr. of Science, St. Petersburg State University, a.samsonov@spbu.ru.

НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ – СЕТЬ РАДИОТОМОГРАФИИ

В.В. Алпатов, А.Е. Васильев, П.А. Будников, Д.А. Молодцов, А.Ю. Репин

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»)

Приведено описание принципов создания, структуры и возможностей созданного в ФГБУ «ИПГ» в 2011–2015 годах нового инструмента для мониторинга состояния ионосферы – сети радиотомографии ионосферы. Сеть радиотомографии ионосферы создавалась как сегмент подсистемы мониторинга ионосферы, входящей в систему мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ. Это позволяет проводить дистанционную диагностику трехмерного состояния ионосферы при помощи специально разработанных программно-аппаратных комплексов и информационных технологий, позволяющих эффективно управлять работой сети.

Ключевые слова: радиотомография, ионосфера, мониторинг, программно-аппаратные комплексы, информационные технологии, ГНСС.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг ионосферы – важная и актуальная задача для практических нужд. Большая территория РФ, существование значительных регионов с крайне низкой плотностью населенных пунктов и неразвитостью технической инфраструктуры существенно затрудняют использование традиционных средств мониторинга ионосферы, например, ионозондов вертикального зондирования.

В настоящее время существуют развернутые группировки глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, разворачивается система GALILEO. Продолжают действовать также группировки низкоорбитальных спутниковых навигационных систем типа «Космос», «Транзит». Конфигурация спутников этих навигационных систем и большое количество наземных приемников, которые могут быть размещены практически в любой точке поверхности Земли, позволяют контролировать состояние ионосферы в определенных регионах в одно и то же время суток, на большой территории, в труднодоступных районах, удаленных от пункта наблюдения, где они размещены, на расстояния свыше 1000 км.

В мире существует много национальных и международных сетей приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), наиболее известная из них IGS. На территории РФ имеется несколько станций этой сети.

Алпатов Виктор Владимирович – зав. отделом, ФГБУ «ИПГ», к.ф.-м.н., v_alpatov@mail.ru.

Васильев Алексей Евгеньевич – н.с., ФГБУ «ИПГ», к.ф.-м.н., alex_vass@mail.ru.

Будников Павел Алексеевич – н.с., ФГБУ «ИПГ», pavel9860@gmail.com.

Молодцов Дмитрий Андреевич – н.с., ФГБУ «ИПГ», dmich.86@mail.ru.

Репин Андрей Юрьевич – зав. лабораторией, ФГБУ «ИПГ», д.ф.-м.н., repin_a_yu@mail.ru.

В России также создан ряд коммерческих сетей высокоточного позиционирования, в основном, в Европейской части страны.

Но до недавнего времени в РФ не существовало какой-либо системы, которая могла бы выдавать информационную продукцию о состоянии ионосферы, подобно той, которая, например, предоставляется сетью IGS¹, сервисом SWACI² и др.

В последние 3 года такая система создана в ФГБУ «ИПП» и выдает информацию о трехмерном состоянии ионосферы над всей территорией РФ.

ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ РОСГИДРОМЕТА

Опыт использования сигналов ГНСС для исследований ионосферы показал, что одним из наиболее перспективных направлений использования спутниковых навигационных сигналов для мониторинга ионосферы является разработка радиотомографических методов. Без существенных финансовых затрат (не считая стоимости спутников, которые разрабатывались для решения других задач) томографическое радиопросвечивание ионосферы позволяет решать ряд научных и прикладных задач. При этом возможно эффективное комплексирование радиотомографических и других методов, использующих прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем, вследствие того, что аппаратура наблюдательных пунктов во всех случаях будет одинаковой и может быть параллельно использована в различных методах и алгоритмах. Поэтому особое внимание при разработке концепции сети было уделено методу радиотомографии.

В России к этому времени имелись значительные научно-методические разработки на мировом уровне в области радиотомографии ионосферы. Они были выполнены на Физическом факультете МГУ (В.Е. Куницын) и в Полярном геофизическом институте РАН (Е.Д. Терещенко).

При разработке сети были сформулированы основные принципы ее создания.

1. Сеть должна быть создана на основе инфраструктуры Росгидромета – аппаратура для приема сигналов ГНСС и передачи в Центр обработки должна располагаться на метеостанциях, принадлежащих Росгидромету, что позволило бы использовать корпоративные возможности этой государственной организации и сделать сеть частью системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ.
2. Созданная сеть должна соответствовать мировой тенденции по созданию систем четырехмерного отображения ионосферы (4D-отображение), означающее возможность для потребителя получать информацию о трехмерной структуре ионосферы в реальном или квазиреальном времени.
3. Сеть радиотомографии должна быть включена в создаваемую подсистему мониторинга ионосферы как сегмент и позволять использовать полу-

¹ <http://www.igs.org>

² <http://swaciweb.dlr.de>

- чаемые данные от навигационных спутников различным пользователям в их специальных программных продуктах.
4. Сеть должна быть оснащена сетевыми программно-аппаратными комплексами (ПАК) сбора и передачи данных в Центр обработки данных (ЦОД) подсистемы мониторинга ионосферы. Сетевые ПАК должны быть автоматическими, потребляющими минимальную электроэнергию, управляемыми из ЦОД (удаленное администрирование).
 5. В сети должны работать специальные информационные технологии сбора, передачи, обработки, визуализации, распространения информации, получаемой сетью.
 6. Созданные информационные технологии и архитектура сети должны быть масштабируемыми, то есть штатно функционировать при наращивании числа ПАК в сети.
 7. Приемники сигналов ГНСС должны быть двухчастотными, многосистемными, чтобы использовать одновременно сигналы систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и т. д.

РАЗРАБОТАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАБОТЫ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ, КОНФИГУРАЦИЯ СЕТИ

Для практического развертывания сети были использованы приемники с открытыми программными интерфейсами, созданы ПАК и информационные технологии радиотомографической реконструкции.

Малогобаритные, автоматизированные, потребляющие всего 20 Вт электроэнергии, программно-аппаратные комплексы размещены в 140 пунктах на территории РФ, где имеются метеостанции Росгидромета. При проектировании сети радиотомографии были заложены программные основы, позволившие реализовать собственные механизмы передачи данных и массового управления радиоприёмными устройствами и входящими в состав комплексов вычислительными машинами.

В составе сети радиотомографии создано два сегмента, дополняющие друг друга: сегмент низкоорбитальной радиотомографии (НОРТ) (рис. 1а) и сегмент высокоорбитальной радиотомографии (ВОРТ) (рис. 1б). Сегмент НОРТ состоит из 13 ПАК, размещенных вдоль двух цепочек, вытянутых в меридиональном направлении. Используемые в этом сегменте двухчастотные ПАК принимают сигналы низкоорбитальных спутников типа «Космос», «Transit», передают их в ЦОД в ФГБУ «ИПГ», где происходит восстановление меридионально-высотных разрезов электронной концентрации методами двумерной радиотомографии.

Сегмент ВОРТ состоит из 127 ПАК, размещенных по всей территории РФ от Калининграда до Анадыря и от Диксона до Лазо. Используемые в этом сегменте ПАК оборудованы многочастотными (L1, L2, L5) многосистемными приёмниками сигналов высокоорбитальных глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS/SBAS/QZSS/GALILEO серийного производства (Javad Alpha). Для реконструкции 3D состояния ионосферы используются методы 3D томографии.

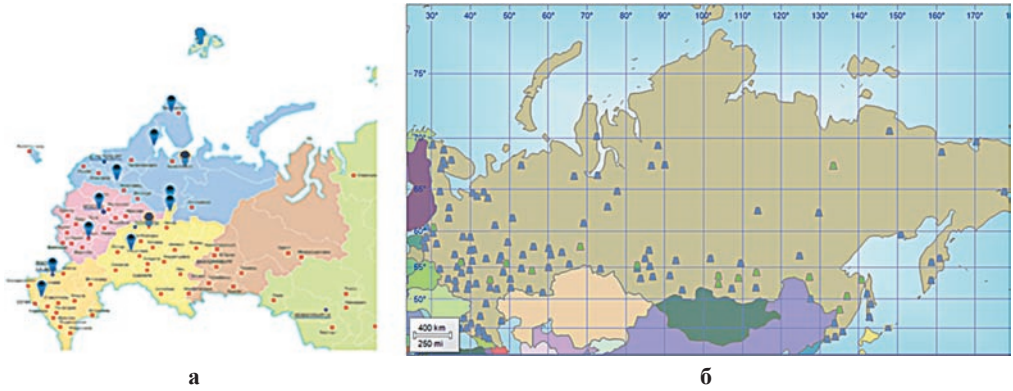


рис. 1. Сегменты низкоорбитальной (а – 13 ПАК – синие фигуры в двух цепочках) и высокоорбитальной (б – 127 ПАК – синие точки) радиотомографии на карте РФ.

На рис. 2 представлена схема организации сети радиотомографии как подсистемы. Из этой схемы видна организация потоков данных от измерительной платформы до серверов Федерального информационно-аналитического центра ФГБУ «ИПГ», а также состав разработанного программного обеспечения как сетевых комплексов, так и радиотомографических серверов.

В настоящее время сеть радиотомографии прошла верификацию с использованием сети наземных ионозондов вертикального зондирования.

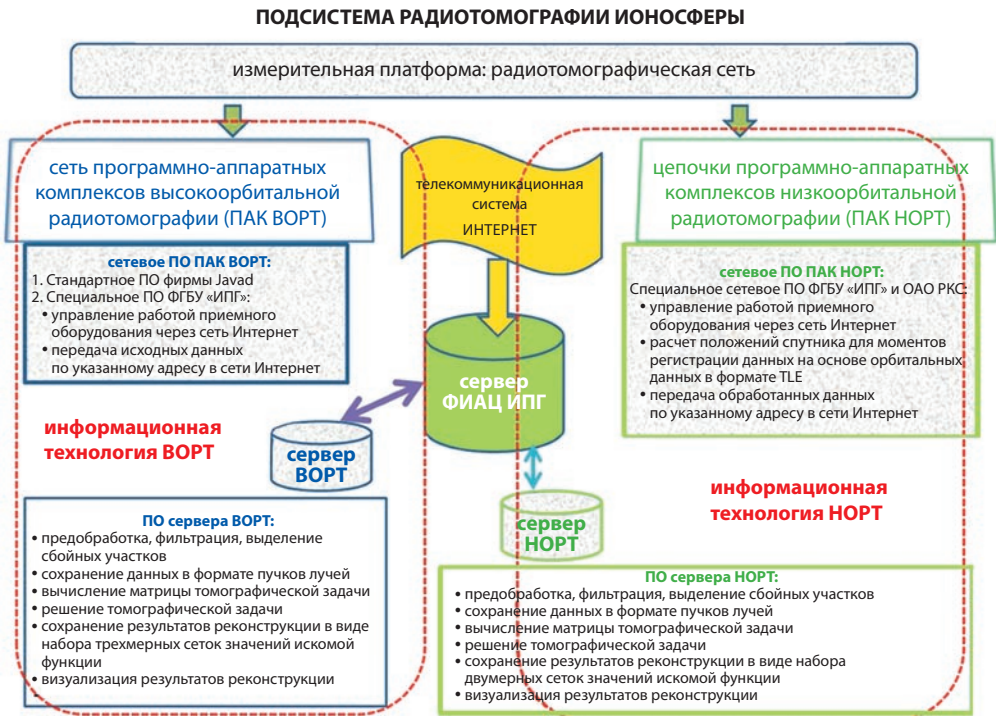


рис. 2. Схема организации сети радиотомографии.

На рис. 3 представлена таблица, показывающая коэффициент корреляции, среднее значение разности и среднеквадратическое отклонение разности между часовыми значениями критической частоты слоя F2, полученными сетью радиотомографии и ионозондами, размещенными на территории РФ в различных широтных и долготных зонах. Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции изменяются от 0,8 до 0,94. Расхождения между данными включают в себя погрешности интерполяции. Видно также, что для регионов с более плотным покрытием территории ПАК коэффициент корреляции выше.

	коэффициент корреляции	среднее значение разности, МГц	среднеквадратическое отклонение разности, МГц	число измерений
Троицк	0,94	-0,09	0,79	7100
Калининград	0,915	-0,24	0,75	6700
Ростов-на-Дону	0,92	-0,17	0,64	4200
Салехард	0,87	-0,12	0,54	3900
Мурманск	0,82	0,25	0,9	2000
Подкаменная Тунгуска	0,813	0,29	0,63	1800
Томск	0,88	0,27	0,66	2300

рис. 3. Таблица сравнения результатов измерения ионозондами и сетью радиотомографии критической частоты слоя F2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОДУКТЫ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ

После прохождения процедуры верификации информационные продукты сети радиотомографии частично выкладываются на сайте ФГБУ «ИПГ» (рис. 4). В настоящее время на сайте выкладываются (рис. 5): карты пространственного распределения критической частоты f_0F_2 , 27 дневной медианы f_0F_2 , ПЭС, часового изменения ПЭС, эквивалентной толщины ионосферы, зон превышения параметром f_0F_2 3-х СКО от медианы, широтно (долготно)-высотные сечения. Кроме того, возможно получение следующих данных:

- карт трехмерного пространственного распределения электронной концентрации ионосферы над территорией РФ и сопредельных государств;
- карт двумерного пространственного распределения высот максимума слоя F2 над территорией РФ и сопредельных государств;
- карт двумерного распределения коэффициента и индекса ионосферных возмущений и полосы когерентности трансionoсферного канала связи над территорией РФ и сопредельных государств;
- карт трехмерного распределения направлений и скоростей движения плазмы в ионосфере над территорией РФ и сопредельных государств;
- карт двумерного распределения широтных и долготных градиентов изменения электронной концентрации, а также ее изменений во времени;
- параметров волновых возмущений в ионосфере на основе использования технологий GPS-интерферометрии.

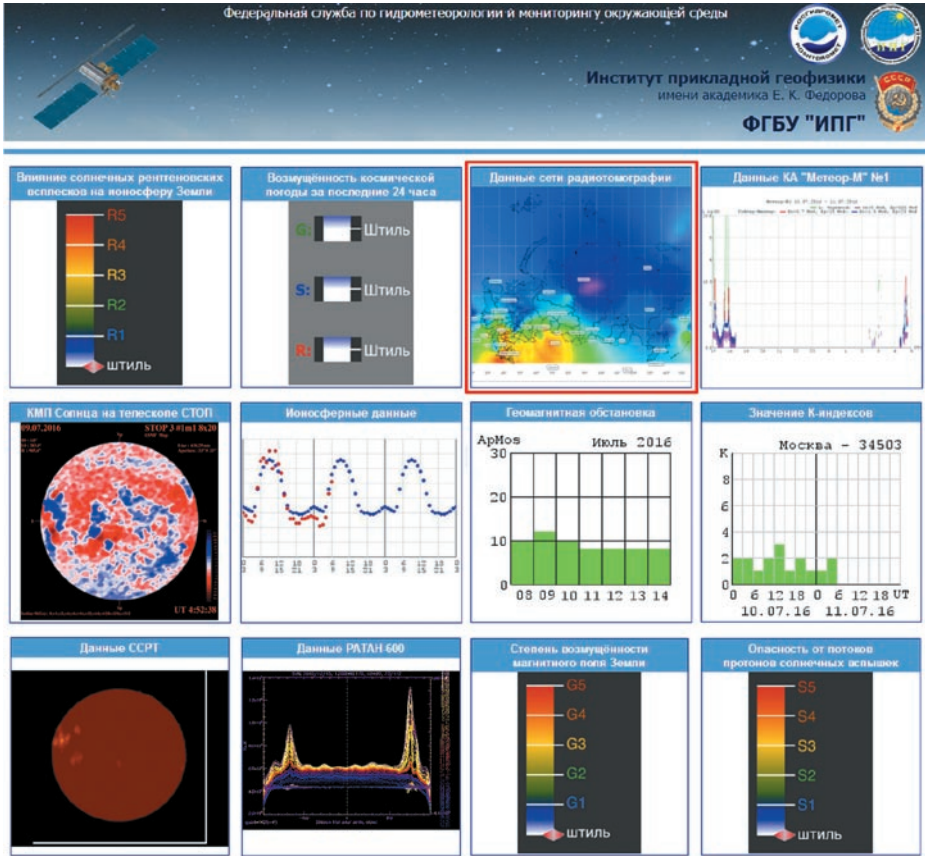


рис. 4. Скриншот сайта ФГБУ «ИПГ».

Красным квадратом в верхнем ряду обведен переход на данные сети радиотомографии.

В настоящее время карты имеют пространственное разрешение 1,4 градуса по широте и долготе, 80 км по высоте, скважность по времени 1 час. При улучшении качества связи между ФГБУ «ИПГ» и ПАК существующие алгоритмы позволяют уменьшить время обновления информации до 15 минут. Ведутся доработки, которые позволят на Европейской части территории РФ получить пространственное разрешение 0,7 градуса по широте и долготе, 40 км по высоте.

ПОТЕНЦИАЛ СЕТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЙ КООПЕРАЦИИ И ИНТЕГРАЦИИ

Геодезический класс, к которому принадлежат приёмники сети радиотомографии, позволяет использовать сеть не только для получения ионосферных продуктов, но и в других перспективных направлениях гражданских отраслей. В частности, результаты развёртывания сети заинтересовали ряд государственных ведомств, при условии ограниченных доработок, для конкретных прикладных применений, например, для дифференциальной коррекции в реальном времени всех пользователей ГНСС приемников – геодезических, картографических, навигационных.

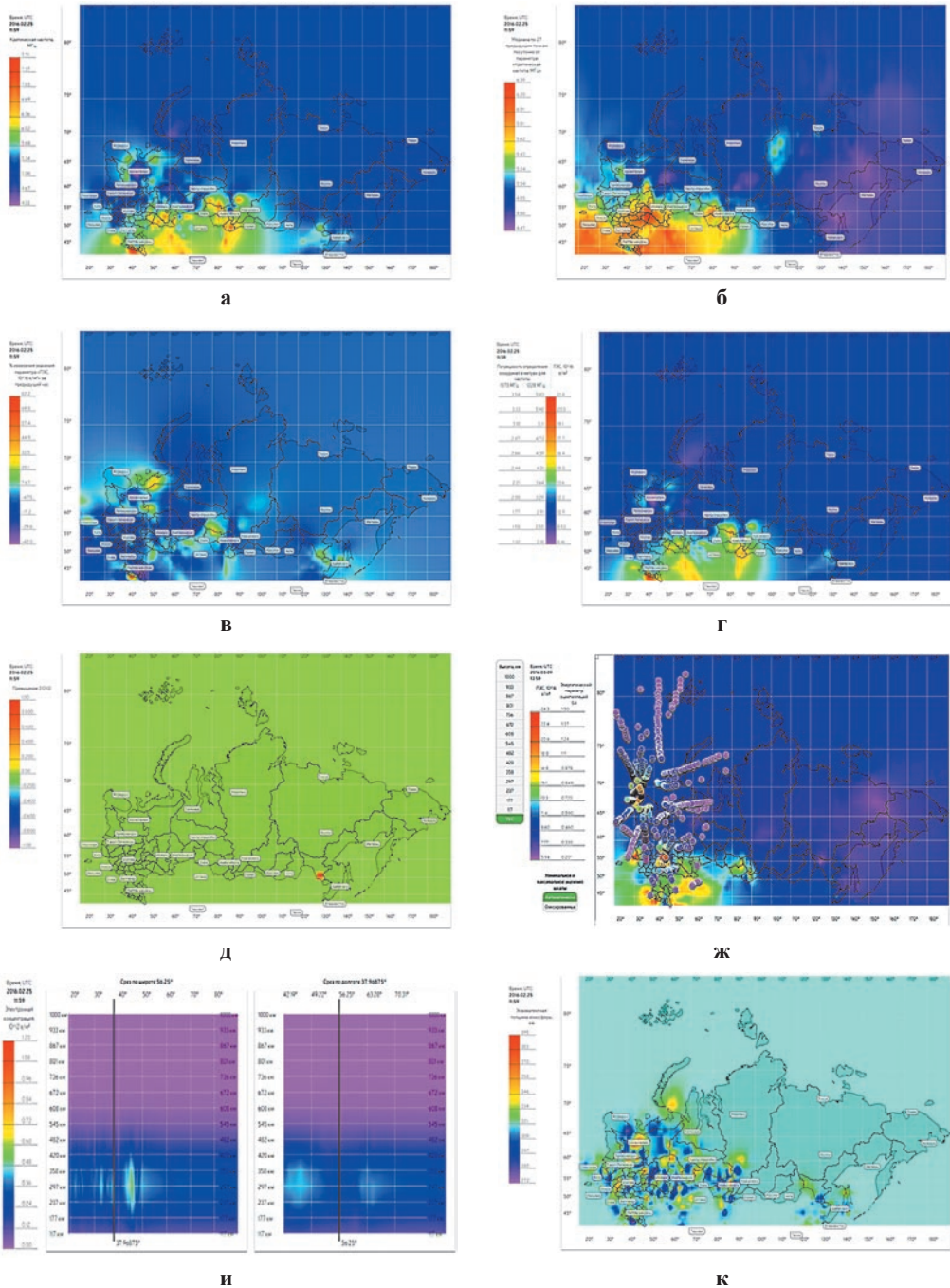


рис. 5. Двумерные карты распределения параметров, характеризующих состояние ионосферы
 (а) f_0F_2 ; (б) f_0F_2 – 27-дневная медиана;
 (в) Часовое изменение ПЭС; (г) ПЭС;
 (д) Зоны возмущений: $f_0F_2 > 3 \cdot \text{СКО}$ от медианы; (ж) Индекс синтилляций;
 (и) широтно (долготно)-высотные сечения; (к) эквивалентная толщина ионосферы.

В настоящее время интерес представляет не только закупленное и запущенное радиоприёмное оборудование геодезического класса, но также налаженный порядок технического обслуживания и учёта, собственная инфраструктура сетевого управления и передачи данных. Существенными отличиями созданной сети являются опыт использования выделенных линий ведомственной связи без выхода в Интернет, возможность работы всех пунктов в автономном режиме по ГЛОНАСС, возможность ремонта приёмников производителем на территории России без отправки в зарубежные диагностические лаборатории, самое широкое из всех сетей приемников сигналов ГНСС покрытие территории РФ на Севере.

Учитывая количество станций и централизацию созданного ресурса, существуют предпосылки для формирования многофункциональной сети, способной совместить интересы ряда ведомств и экономических отраслей при доработках в интересах потребителей. Такая работа в настоящее время начата рядом организаций. Это связано с тем, что на территории Российской Федерации по некоторым данным установлены и используются в качестве одиночных или объединенных в локальные сети около 800 корректирующих станций ГЛОНАСС/GPS, принадлежащих различным юридическим и физическим лицам. Многие из этих станций и локальных сетей на их основе построены за счет средств государственного бюджета федерального и регионального уровней. Формирование многофункциональной сети позволит более рационально использовать имеющиеся материальные и финансовые ресурсы.

TNE NEW FACILITY OF MONITORING THE IONOSPHERE – RADIO TOMOGRAPHY NETWORK

V.V. Alpatov, A.E. Vasiliev, P.A. Budnikov, D.A. Molodtsov, A.Yu. Repin

Fedorov Institute of Applied Geophysics (FSBD “IPG”)

The principles of development, structure and possibilities of the new facility of monitoring the ionosphere – radio tomography of the ionosphere network, created during 2011–2015 years are described. Radio tomography of the ionosphere network has been developed as ionosphere monitoring subsystem segment included in the monitoring system of the geophysical environment under Russian Federation territory. Network creation allows us to do remote diagnostics of a three-dimensional state of the ionosphere by use the specially developed software and hardware systems and information technologies, which allow us to effectively manage the network.

Keywords: radiotomography, ionosphere, monitoring, software and hardware systems, information technologies, GNSS.

Alpatov Victor Vladimirovich – head of a department, FSBD “IPG”, Ph.D, v_alpatov@mail.ru.

Vasiliev Aleksei Evgenievich – scientist, FSBD “IPG”, Ph.D, alex_vass@mail.ru.

Budnikov Pavel Alekseevich – scientist, FSBD “IPG”, pavel9860@gmail.com.

Molodtsov Dmitry Andreevich, scientist, FSBD “IPG”, dmich.86@mail.ru.

Repin Andrey Yurjevich – head of a laboratory, FSBD “IPG”, Dr. of science (physics and mathematics), repin_a_yu@mail.ru.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ NEQUICK ДЛЯ РЛС УКВ ДИАПАЗОНА

В.Б. Оводенко, В.В. Трекин

Открытое акционерное общество

«Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» (НИИДАР)

В докладе представлены экспериментальные данные по компенсации влияния среды распространения радиоволн. Исследуемый параметр – ошибка измерения дальности, обусловленная дополнительной задержкой времени распространения радиосигналов в атмосфере Земли. Путём сопоставления измеренных и эталонных координат космических объектов определяются ошибки определения координат, вызванные влиянием атмосферы Земли. Компенсация ошибок измерения дальности производится путем внесения корректирующих поправок, рассчитанных на основе модели нейтральной атмосферы и модели ионосферы NeQuick.

Ключевые слова: РЛС, ионосфера, NeQuick.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Земли оказывает значительное влияние на распространение радиоволн. Применительно к радиоволнам УКВ диапазона это влияние главным образом сводится к эффектам рефракции и запаздывания радиосигнала, приводящих к радиолокационным ошибкам измерения угла места и дальности соответственно [1].

Целью статьи является исследование эффективности компенсации влияния среды распространения радиоволн по экспериментальным данным наблюдения космических аппаратов. При проведении данного исследования были использованы невязки между реальными измерениями радиолокационной станции (РЛС) дециметрового диапазона по космическим аппаратам (КА), оснащенным ретро-рефлекторами, и эталонными измерениями РЛС, полученными на основе высокоточных орбитальных параметров по вышеуказанным КА.

В процессе исследования были использованы два типа данных. В первом случае рассматривались невязки измерения дальности, полученные без применения поправок к реальным измерениям РЛС. Во втором случае рассматривались невязки, полученные в результате применения поправок по дальности к радиолокационным измерениям.

РАСЧЁТ ПОПРАВОК И ОЦЕНКА ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ РЛС

Для расчёта поправок на рефракцию необходимо знание коэффициента преломления в зоне действия РЛС, а также алгоритм расчёта траектории распространения радиоволн. В диапазоне высот от 0 до 60 км коэффициент преломления

Оводенко Владимир Борисович –нач. тематического отд., НИИДАР, к.т.н., ovoedenko@gmail.com.

Трекин Вячеслав Владимирович – с.н.с., НИИДАР, к.т.н., доцент, news197@mail.ru.

определяется на основе региональной эмпирической модели нейтральной атмосферы [2]. Исходными данными для модели нейтральной атмосферы являются: географические координаты и месяц года. В диапазоне высот от 60 до 20000 км коэффициент преломления определяется на основе глобальной эмпирической модели ионосферы NeQuick [3]. Исходными данными для модели ионосферы являются: географические координаты, дата и время, а также уровень солнечной активности. В настоящей работе в качестве индекса солнечной активности было выбрано сглаженное 12-месячным фильтром значение числа Вольфа (R12).

Для расчёта траектории распространения радиоволны выбран метод геометрической оптики. Расчёты по вышеуказанному методу производятся в местной топоцентрической системе координат, связанной с антенной РЛС. Исходными данными для расчёта поправок являются: видимый угол места и азимут. Атмосфера разбивается на ряд сферических слоев с коэффициентом преломления, постоянным для каждого элементарного слоя. В каждом слое рассчитывалось искривление лучевой траектории и задержка времени распространения. Алгоритм позволяет рассчитывать полную групповую задержку в нейтральной атмосфере и ионосфере, а также истинный угол места.

Необходимо отметить, что рассчитанные поправки соответствуют случаю среднемесячной ионосферы. Коррекция параметров ионосферы по внешним измерениям не проводилась.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В докладе рассматриваются экспериментальные данные по двум среднеширотным радиолокационным станциям с различной ориентацией зоны действия. Первая РЛС расположена в районе г. Краснодар (45°N , 39°E) и ориентирована на юго-запад. Вторая РЛС расположена в районе г. Калининград ($54,4^{\circ}\text{N}$, $20,3^{\circ}\text{E}$) и ориентирована на запад. Экспериментальные данные по первой РЛС были получены в период с 28 по 31 марта 2015 года, а на второй РЛС – в период с 2 по 20 августа 2015 года.

Ошибка определения координат вычислялась как разность между измеренным и эталонным значением. В качестве реальных измерений в данной работе использовались единичные измерения РЛС, полученные при сопровождении космических аппаратов юстировочного класса, по которым известны высокоточные координаты. Перечень КА по которым проводились измерения: Beacon-C, Starlette, Ajisai, Stella, Larets, Jason-2, Cryosat-2, Haiyang 2A.

Для обработки экспериментальных данных использовались трехмерные массивы поправок, представленные в системе координат: дальность, угол места и азимут. Поправки применялись к радиолокационным измерениям. Величина поправки для цели с заданными координатами внутри трехмерного массива вычислялась путем интерполяции между соседними узлами.

Ошибки измерения дальности для случая без внесения поправок и с внесением поправок представлены на рисунках 1а и 1б. На рисунке 1а представлены данные по РЛС-1, а на рисунке 1б – для РЛС-2. С легендой “NeQuick corr” пока-

заны ошибки измерения дальности, полученные с компенсацией влияния среды распространения радиоволн. С легендой “No correction” показаны ошибки, полученные без применения поправок к траекторным измерениям.

Ошибки измерения дальности представлены в условных единицах (у.е.).

По экспериментальным данным для РЛС-1 наблюдается ярко выраженный суточный ход в ошибке измерения дальности, обусловленный суточным изменением электронной плотности ионосферы. В дневное время (10–18 UT) ошибки по дальности достигают значений 3–5 у.е., что примерно в 1,5–2 раза больше, чем в ночное время.

Для РЛС-2 суточный ход ошибки и измерения дальности явно не выражен. Абсолютные значения ошибок меньше, чем для РЛС-1. На протяжении суток величина ошибки измерения дальности находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 у.е.

Такое различие в величии ошибки измерения дальности может быть объяснено отличием двух РЛС по географической широте и ориентацией зоны действия.

Применение поправок позволяет уменьшить ошибки измерения дальности. Для РЛС-1 в ночное время ошибки уменьшается почти до нуля. В дневное время наблюдается положительная остаточная ошибка порядка 1–2 у.е. Для РЛС-2 наблюдается отрицательная остаточная ошибка измерения дальности, которая достигает значений –0,5 у.е. В обоих случаях остаточная ошибка может быть обусловлена отличием реального состояния ионосферы от среднемесячного состояния, определяемого моделью NeQuick.

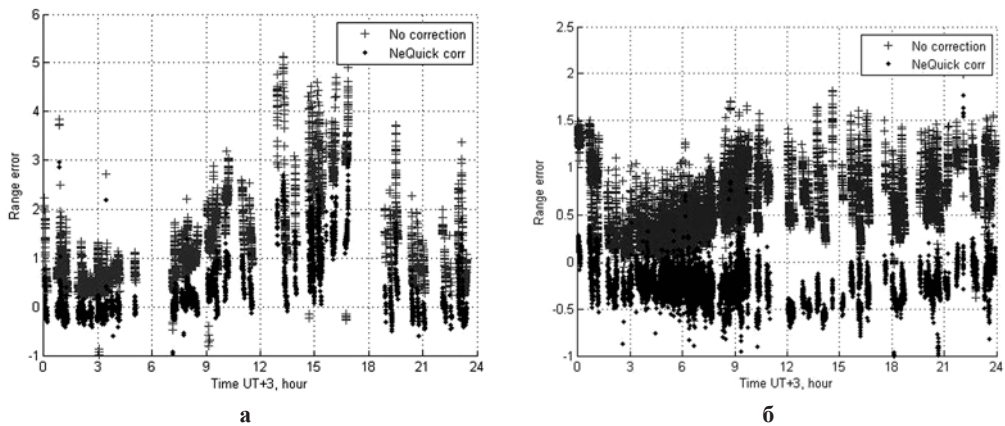


рис. 1. Зависимость ошибки измерения дальности от времени суток для случаев: без внесения поправок (“No correction”) и с внесением поправок (“NeQuick corr”) для РЛС-1 (а) и для РЛС-2 (б).

В таблицах 1 и 2 представлены статистические характеристики по ошибкам определения дальности: средняя ошибка и математическое ожидание ошибки для случаев с компенсацией и без компенсации. В таблице 1 представлены данные по РЛС-1, а в таблице 2 – по РЛС-2.

Средняя ошибка измерения дальности уменьшилась на 74,6 % и на 51,7 % для РЛС-1 и РЛС-2, СКО ошибки уменьшилось на 33 % и 45 % соответственно.

таблица 1

	среднее	СКО
без компенсации	1,36	1,00
с компенсацией	0,32	0,67

таблица 2

	среднее	СКО
без компенсации	0,58	0,33
с компенсацией	-0,25	0,18

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы следующие. Исследование экспериментальных данных траекторных измерений юстировочных КА показало, что применение поправок позволяет уменьшить среднюю ошибку измерения дальности и СКО ошибки. Для двух РЛС с различным расположением и ориентаций зоны действия наблюдаются различные абсолютные значения ошибок, а также такие характерные зависимости как суточный ход ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Millman H.* Atmospheric Effects on VHF and UHF Propagation, in Proceedings of the IRE. Aug. 1958. Vol. 46. № 8. P. 1492-1501. DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286970
- [2] *Соколов К.С., Трекин В.В., Оводенко В.Б., Патронова Е.С.* Метод оперативного учета влияния среды на траекторные измерения. // Успехи современной радиоэлектроники, №2, 2012. С. 17-21.
- [3] *Giovanni G.D., Radicella S.M.* An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Advances in Space Research, 10 (11), 1990. P. 27-30.

THE EXPERIMENTAL DATA ON THE EFFECTIVENESS OF COMPENSATION ATMOSPHERIC EFFECTS THROUGH NEQUICK MODEL FOR UHF RADAR

V.B. Ovodenko, V.V. Trekin

Joint Stock Company Scientific research institute of long-distance radio communication

The experimental data on compensation radiowave propagation influence are presented. The investigated parameter is range error due to additional radiowave delay in Earth atmosphere. The range error caused Earth atmosphere is calculated by comparing measured and reference satellite coordinates. The compensation of range error produced by applying corrections calculated with neutral atmosphere model and NeQuick ionosphere model.

Keywords: radar, ionosphere NeQuick.

Ovodenko Vladimir Borisovich – head of department, Ph.D, ovodenko@gmail.com.

Trekin Vyacheslav Vladimirovich – senior researcher, Ph.D, assistant professor, news197@mail.ru.

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РФ

А.А. Титов, В.У. Хаттатов

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение
«Центральная аэрологическая обсерватория» (ФГБУ «ЦАО»)

Разработана трехмерная ассимиляционная модель ионосферы, учитывающая данные измерений полного электронного содержания в ионосфере в реальном времени, усваивающая данные с некалиброванной сети станций глобальных навигационных спутниковых систем. Модель базируется на уравнениях непрерывности, что позволяет рассчитывать пространственно-временные распределения электронной концентрации, концентрации семи основных ионов, температуру и скорости электронов и ионов в ионосфере в области высот от 100 до 20000 км. Представлены результаты моделирования на примере критических частот слоя F2 с использованием данных некалиброванной сети станций и без их использования. Представлено сравнение результатов расчета ассимиляционной модели с данными ионозондовых измерений критической частоты, демонстрирующее удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: ионосфера, трехмерная ассимиляционная модель, мониторинг, данные реального времени, некалиброванные данные.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует множество инструментов изучения ионосферы, далеко не все они пригодны для глобального мониторинга ее текущего состояния. Так, в частности, физически обоснованные теоретические численные модели реализуются отдельно для случаев возмущенной и не возмущенной ионосферы, и сами по себе не могут претендовать на адекватность отражения текущей ситуации. Эмпирические модели, представляющие собой статистическое усреднение большого количества экспериментальной информации, способны выдавать медианные значения основных параметров ионосферы, наиболее характерных для данного времени и географического положения. Необходимым условием для мониторинга текущего состояния ионосферы является использование оперативной экспериментальной информации.

Одна из перспективных возможностей получения экспериментальной информации о состоянии ионосферы в реальном времени связана с использованием радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Навигационный сигнал содержит в себе информацию об интегральном количестве электронов на пути его распространения. В последнее десятилетие данные ГНСС (Глобальные навигационные спутниковые системы) стали также применяться для мониторинга и изучения ионосферных процессов [Manucci et al, 1999; Афраймович и др.,

Титов Антон Александрович – н.с., ФГБУ «ЦАО», к.ф.-м.н., antonio.foraldovich@gmail.com.

Хаттатов Вячеслав Усеинович – зав. отделом, ФГБУ «ЦАО», к.ф.-м.н., slava.khattatov@gmail.com.

2000; Марчук и др., 2001]. Навигационные системы являются одним из мощных инструментов изучения глобальных и региональных ионосферных процессов, а также обнаружения вариаций характеристик ионосферы при различных условиях. Дистанционные измерения интегральной электронной концентрации позволяет осуществлять не только мониторинг процессов ионосферы и анализ движения ионосферных неоднородностей, но и проводить оценки характеристик радиоволн при их распространении через ионосферу Земли.

АССИМИЛЯЦИОННАЯ СХЕМА

Ассимиляционная модель предназначена для оценки текущего состояния ионосферы и параметров внешних воздействий. Теоретическая численная физически обоснованная модель ионосферы, применяемая в данной работе, описана в [Solomentsev et al, 2011; Титов, 2015]. В указанных публикациях представлены основные уравнения магнитной гидродинамики, описывающие состояние ионосферной плазмы, их приближения и разложения на конечно-разностные схемы для численного решения системы нелинейных уравнений. Реализация численной физически обоснованной модели ионосферы выполнена на языке C++ в объектно-ориентированном стиле. После компиляции, модель представляет собой исполняемый файл в среде UNIX, принимающий на вход файл с пользовательскими настройками. Настройки включают в себя технические параметры запуска физически обоснованной модели ионосферы.

Система ассимиляции экспериментальных данных в результаты расчетов численной модели рассмотрена в [Khattatov et al, 2005]. Система ассимиляции данных была реализована автором на языке MatLab. Выбор этого языка программирования связан с относительной простотой построения параллельных программ в рамках принятых программных шаблонов. Из-за больших объемов расчетов и потоков данных, возможность параллельной обработки информации является важным элементом разработанной системы, позволяющим ей работать в режиме квази-реального времени.

На рис. 1 представлена схема работы экспериментального образца аппаратно-программного комплекса (АПК), разработанного авторами в ФГБУ ЦАО на базе ассимиляционной модели ионосферы. АПК включает: комплекс служебных программ для сбора данных в сети Интернет, комплекс программ обработки полученной информации, комплекс программ расчета параметров ионосферы с помощью физически обоснованной модели и корректировки результатов на основе фильтра Калмана, с помощью массивов данных о полном электронном содержании.

В частности, выходными параметрами модели являются трехмерные распределения концентраций основных 7 типов ионов (H^+ , He^+ , O^+ , O_2^+ , NO^+ , N^+ , N_2^+) и электронов, а также скорости и температуры всех восьми компонент. Также могут быть выведены результаты расчета скоростей соударений электронов, скоростей фото ионизации, химических реакций и другие вспомогательные данные.

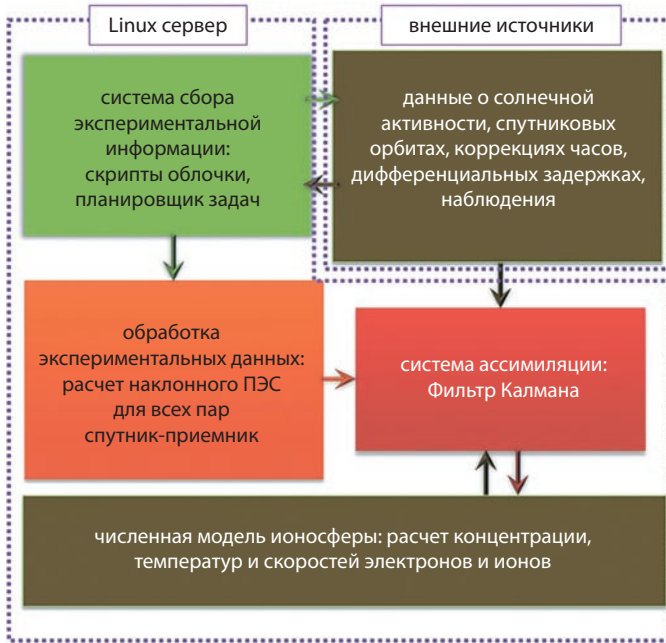


рис. 1. Схема работы АПК на основе ассимиляционной модели ионосферы ЦАО.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Мониторинг состояния ионосферы Земли в режиме реального времени дает возможность обеспечить надежное функционирование систем связи, учитывать влияние ионосферы на распространение радиоволн непосредственно в момент эксперимента, повысить точность определения текущего местоположения объектов системами спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС и др.).

Очевидно, что одним из наиболее важных направлений усовершенствования технологии мониторинга ионосферы является разработка алгоритма, позволяющего получать, обрабатывать и ассимилировать навигационные данные, соответствующие реальному времени, в том числе и использовать текущие аппаратные задержки.

В качестве инструмента получения данных наблюдений ГНСС в режиме реального времени могут использоваться сжатые файлы RINEX, записываемые и транслируемые с частотой 60, 30, 15 или 5 минут. Но использование протокола NTRIP (сокр. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) там, где это возможно, значительно упрощает процесс ассимиляции данных. Поток передаваемой информации непосредственно перед процессом ассимиляции значительно сокращается, дискретизация усвоения данных может быть выбрана любой, зависящей только от вычислительных мощностей. BNC (BKG NTRIP Клиент) – это программа для одновременного получения, декодирования, преобразования и обработки в реальном времени потоков данных ГНСС.

Программное обеспечение BNC было написано под лицензией GNU General Public License (GPL). Данный программный комплекс работает с данными стан-

дорта RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), по средствам протокола NTRIP. Основанный на протоколе передачи гипертекста HTTP/1.1, NTRIP является протоколом прикладного уровня, передающий данные со станций ГНСС через Интернет.

Система NTRIP в целом реализуется в трех программных компонентах: «Клиент», «Сервер», «Распределитель».

Распределителем фактически является программа HTTP-сервер, тогда как «Клиент» и «Сервер» действуют как HTTP клиенты. Данные со всех приемников поступают на распределитель, который в свою очередь обрабатывает запросы пользователей, и транслирует им необходимую информацию. Чтобы обеспечить надежность и бесперебойность данной системы, в качестве распределителей используются несколько локальных центров. Такая схема позволяет системе функционировать без потери данных в случае возникновения перебоев с электропитанием, Интернет-соединением и любых других локальных непредвиденных ситуаций.

Главным минусом системы является то, что использование протоколов потоковой передачи данных NTRIP не является обязательным условием для функционирования многих станций. В связи с чем, используют данный протокол всего порядка 15 % от общего количества станций, транслирующих навигационный сигнал. Кроме того, подключение к имеющейся сети происходит на особых условиях, и доступ к данным может быть существенно ограничен для потребителей информации, не передающих на кластеры NTRIP данные со своих станций.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НЕКАЛИБРОВАННЫХ СЕТЕЙ

Для коррекции измеренной приемником псевдодалности и более точного определения ионосферной составляющей задержки распространения радиосигнала необходимо знать задержку спутниковых часов (которая связана с релятивистскими эффектами и неточностями атомного осциллятора), дифференциальные задержки сигнала спутника и приемника (связанные с тем, что двухчастотный сигнал распространяется в электрической цепи с конечной скоростью, зависящей от несущей частоты) и ошибку часов приемника [Hofman-Wellenhof et al, 1992]. Ошибки и задержки часов регулярно транслируются и могут быть получены из RINEX-файлов (сокр. Receiver Independent Exchange Format). При распространении сигнала в приеме-передающей аппаратуре происходит задержка сигнала, величина которой зависит от частоты самого сигнала. Абсолютные значения задержек каждой из частот для ассимиляции данных не представляют ценности, в отличие от их разницы, которая называется дифференциальной аппаратной задержкой.

Дифференциальные аппаратные задержки (ДАЗ) – один из наиболее важных источников ошибок данных наблюдений сетей ГНСС, генерируемый в цепи передатчика и приемника. Определение ДАЗ является необходимым условием при вычислении полного электронного содержания (ПЭС) вдоль трассы визирования спутник-Земля, а также для решения задач коррекции навигационного сигнала и других прикладных задач.

Дифференциальные задержки сигнала являются технической информацией, без которой ни ассимиляция получаемых экспериментальных данных, ни осуществление мониторинга состояния ионосферы не были бы возможны. Ошибка при определении дифференциальных задержек в 1 нс соответствует ошибке ПЭС приблизительно в 2,9 TECU ($1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16}$ электронов/м²). В публикациях [Ma et al., 2003; Choi et al., 2008] было показано, что абсолютная величина ДАЗ приемника по оценкам измерений GPS и ГЛОНАСС может достигать до нескольких десятков наносекунд. Таким образом, для задачи мониторинга текущего состояния ионосферы отсутствие или некорректное определение значений ДАЗ может привести к ошибкам определения ПЭС в десятки единиц TECU, что по порядку совпадает с суточными вариациями. Для навигационных задач ошибка позиционирования при этом будет составлять десятки метров.

В качестве альтернативы использования данных Международной службы ГНСС IGS (сокр. International GNSS Service) авторами был разработан метод независимой оценки дифференциальных аппаратных задержек. Достоинство этого метода состоит в том, что он позволяет использовать для ассимиляции данные измерений не только от станций, находящихся в сети IGS, но и от других наземных станций приема сигналов ГНСС. При этом получение аппаратных дифференциальных задержек может происходить практически в реальном времени для всех станций.

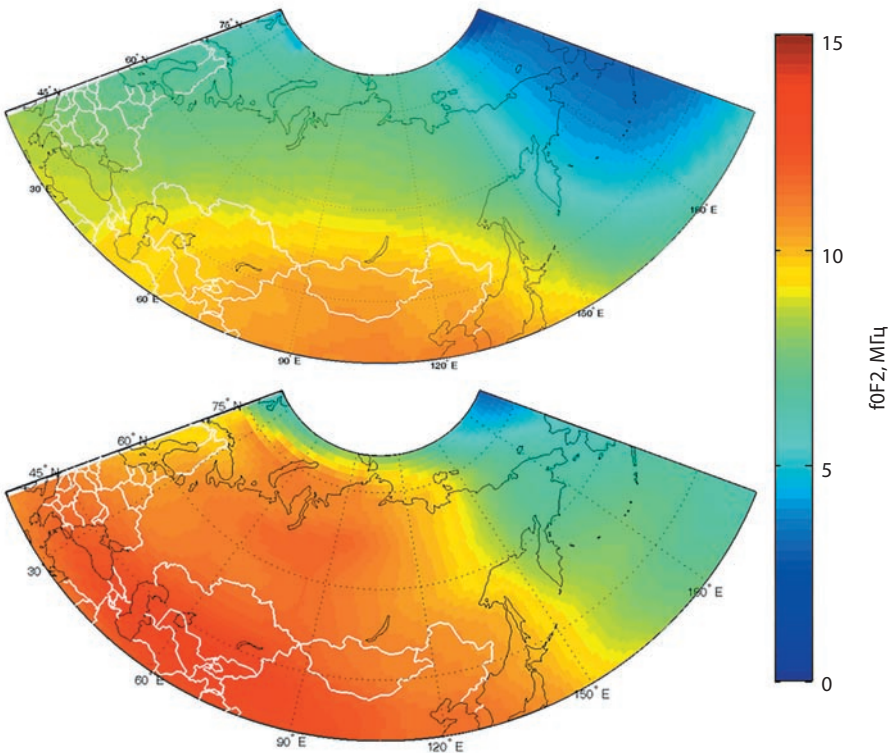


рис. 2. Пример скорректированных значений критической частоты F2.

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ НА СЕТИ РОССИЙСКИХ СТАНЦИЙ

Разработанный метод оценки ДАЗ при использовании данных ГНСС станций Росгидромета, расположенных на территории России, в ассимиляционной модели ионосферы позволяет определить большое количество параметров состояния ионосферы.

В частности, критическая частота слоя F2 представляет интерес для многих групп исследователей и имеет значимое прикладное значение в задачах распространения радиоволн. На рисунке 2 представлены результаты нескорректированных и скорректированных значений f_0F_2 . Коррекция рассчитанных значений f_0F_2 проводилась с учетом ассимиляции экспериментальных данных, полученных с сети станций Росгидромета.

При отсечке экспериментальных данных по углу визирования в 10–12 градусов (наиболее типовые значения) радиус влияния может достигать 1500–1850 км. При отсутствии спутников с большим углом визирования данные для ассимиляции для этой области могут отсутствовать. По этой причине коррекция электронной концентрации над территорией Сибири происходит в малой степени.

Для валидации рассчитанных с помощью ассимиляционной модели значений f_0F_2 были проведены сравнения с данными ионозондовых измерений критической частоты. В качестве эталонных значений использовались дан-

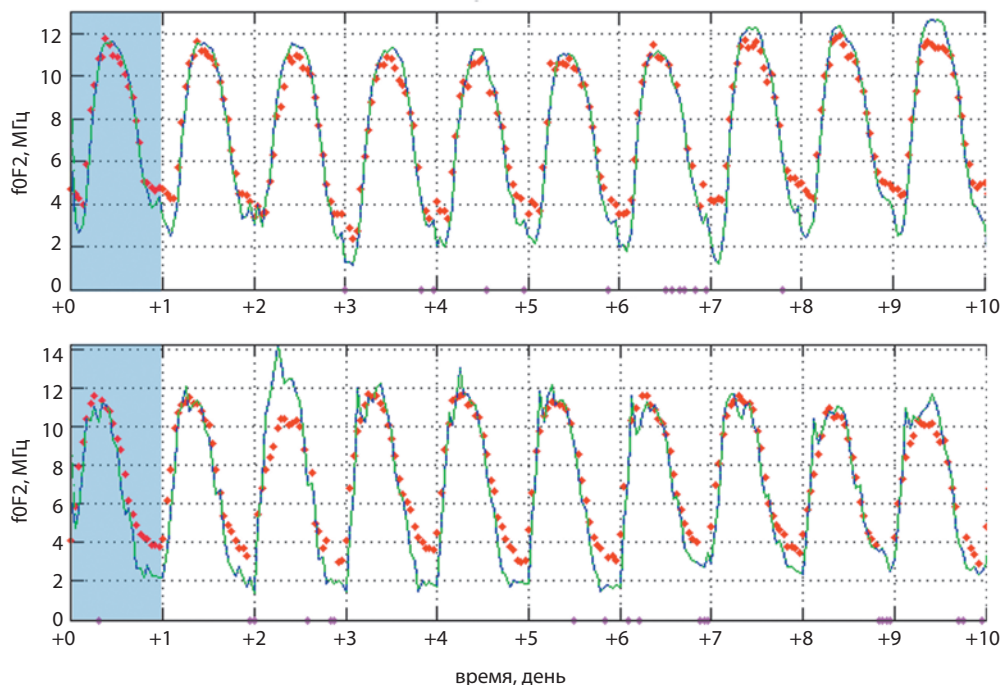


рис. 3. Модельные критические частоты слоя F2 в сравнении с измерениями российских ионозондов, станция «Москва» (верх) и станция «Подкамennая Тунгуска» (низ).

Сплошной зелено-синей линией отмечены результаты расчета f_0F_2 по данным ассимиляционной модели ЦАО, красные точки – данные независимых наблюдений ионозондов.

ные ионозондов, расположенных на территории России. В частности, станции «Москва» ($55,80^\circ$ с.ш., $37,60^\circ$ в.д.) и «Подкаменная тунгуска» ($61,60^\circ$ с.ш., $90,0^\circ$ в.д.). Результаты сравнения полученных критических частот и измерений ионозондов представлены на рис. 3.

Станция «Москва» расположена в европейской части России, и все используемые ГНСС приемники сосредоточены рядом с ней. В связи с этим предполагалось, что сравнение именно по этой станции будет наиболее точным. Станция «Подкаменная Тунгуска» расположена примерно в 1700 км от ближайшего ГНСС приемника. Такая отдаленность предполагает, что данные над этим ионозондом с некоторой периодичностью корректировались, но все-таки гораздо реже станций европейского региона.

При сравнении результатов модельных расчетов с данными экспериментальных измерений со станций, расположенных в Сибири, наблюдается увеличение статистической ошибки определения критической частоты по сравнению с данными измерений со станций европейской части континента. Среднеквадратичное отклонение модельных расчетов f_0F_2 от ионозондовых измерений для станции Москва в среднем за рассматриваемый период составило 0,98 МГц. В то время как для Подкаменной Тунгуски этот показатель оказался несколько выше – 1,38 МГц. Такое изменение можно объяснить малым количеством станций ГНСС, данные с которых можно было бы ассимилировать в модель для коррекции электронной концентрации в области близкой к станции «Подкаменная Тунгуска».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам валидации рассчитанных с помощью ассимиляционной модели значений суточного хода критической частоты можно сделать вывод, что использование метода расчета дифференциальных поправок позволяет использовать данные наблюдений со станций, не находящихся в сети IGS. В частности, как показано в данной работе, метод позволяет успешно ассимилировать в реальном времени данные сети станций ГНСС созданных НИУ Росгидромета на территории Российской Федерации. Результаты расчетов по ассимиляционной модели с использованием расчетов дифференциальных аппаратных задержек хорошо согласуются с независимыми наблюдениями ионозондов и демонстрируют суточные вариации параметра f_0F_2 , близкие к реальным значениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Manucci et al, 1999] *Manucci A.J., Iijima B.A., Lindqwister U. J., Pi X., Sparks L., Wilson B.D.* GPS and ionosphere // *URSI Reviews of Radio Science* 1996–1999. 1999. P. 625-665.
- [Афраймович и др., 2000] *Афраймович Э.Л., Косоголов Е.А., Леонович Л.А., Пирог О.М.* Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений 25 сентября 1998 по данным GPS-сети // *Исследование по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца*. 2000. № 112. С. 142-156.

- [Марчук и др., 2001] *Марчук В.Н., Смирнов В.М.* Определение электронного содержания ионосферы Земли по данным дальномерных и фазовых измерений // Электронный журнал «Исследовано в России». 2001. № 127. С. 1465-1475.
- [Титов, 2015] *Титов А.А.* Ассимиляционная модель ионосферы на основе независимой оценки аппаратных дифференциальных задержек: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2016. – 182 с.
- [Solomentsev et al, 2011] *Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., Titov A. et al.* Ionosphere state and parameter estimation using the Ensemble Square Root Filter and the global three-dimensional first-principle model // Space weather. 2012. V. 10. S07004. P. 13.
- [Khattatov et al, 2005] *Khattatov B., Murphy M., Gnedin M., Sheffel J. et al.* Ionospheric nowcasting via assimilation of GPS measurements of ionospheric electron content in a global physics-based time-dependent model // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005. V. 131. P. 3543-3559.
- [Hofman-Wellenhof et al, 1992] *Hofman-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* GPS theory and practice // Wien: Springer-Verlag. 1992. P. 326.
- [Ma et al., 2003] *Ma G., Maruyama T.* Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan // Annales Geophysicae. 2003. V. 21:P. 2083-2093.
- [Choi et al, 2008] *Choi K.-R., Lightsey E.G.* Total Electron Content (TEC) Estimation Using GPS Measurements Onboard TerraSAR-X // Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2008. P. 923-934.

REAL TIME MONITORING OF THE IONOSPHERE STATE OVER THE RUSSIAN FEDERATION

A.A. Titov, V.U. Khattatov

Federal state budgetary institution «Central Aerological Observatory» (FSBI «CAO»)

A three-dimensional assimilative ionospheric model, which takes into account real time data of the total electron content (TEC) measurement are presented here. Model able to assimilate data from uncalibrated station network of global navigation satellite systems. The model based on the continuity equations that allows to calculate the spatial-temporal distribution of the electron density, the concentration of the seven major ions, temperature and velocity of the electrons and ions in the ionosphere at altitudes of 100 to 20,000 km. Critical frequency f_0F_2 is one of the model output parameters. It is shown as experimental data adjusted value of the critical frequency. A comparison of the assimilative model results with the ionosonde measurements of critical frequency showing satisfactory results.

Keywords: ionosphere, assimilative 3D model, monitoring, real-time data, differential code biases.

Titov Anton – researcher, FSBI «CAO», PhD, antonio.foraldovich@gmail.com.

Khattatov Vyacheslav – department head, FSBI «CAO», PhD, slava.khattatov@gmail.com.

ПРЯМАЯ ОЦЕНКА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ (ТЕС) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

С.С. Аджемов², А.Г. Виноградов¹, Е.М. Лобов², А.Н. Теохаров¹

- ¹ Открытое акционерное общество «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (ОАО РТИ)
- ² Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования Московский Технический Университет Связи и Информатики (ФГОБУ ВПО МТУСИ)

Дан анализ дисперсионных искажений широкополосных радиолокационных сигналов при их распространении через ионосферу Земли. Разработана методика, позволяющая путем специальной обработки принятого широкополосного сигнала оценивать полное электронное содержание ионосферы вдоль луча радиолокатора и компенсировать дисперсионные искажения.

Ключевые слова: электронное содержание ионосферы, дисперсионные искажения, широкополосный радиолокационный сигнал, согласованная фильтрация, радиолокация.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из сравнительно новых задач радиолокации является задача построения радиоизображений с разрешающей способностью порядка десятков сантиметров, что является достаточным для распознавания типа лоцируемого объекта. Как известно, разрешающая способность по дальности обратно пропорциональна ширине полосы частот сигнала, и для такого «сверхразрешения» необходимо использовать достаточно широкополосные сигналы. Например, для достижения разрешающей способности по дальности ΔR порядка 0,75 м требуется сигнал с шириной полосы ΔF порядка 200 МГц.

При распространении настолько широкополосного сигнала через ионосферу необходимо учитывать дисперсионные искажения сигнала, связанные с частотной зависимостью диэлектрической проницаемости ионосферы [1].

В [2] дисперсионные искажения в ионосфере исследованы на примере сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов) с большой базой и показано, что основным искажающим фактором является частотно-зависимый набег фазы каждой спектральной составляющей сигнала, который пропорционален полному электронному содержанию ионосферы ТЕС (total electron content) вдоль траектории сигнала. При зондировании под малыми углами места влияние

Аджемов Сергей Сергеевич – нач. отдела, ФГОБУ ВПО МТУСИ, д.т.н., профессор, adjemov@srd.mtuci.ru.

Виноградов Александр Георгиевич – нач. отдела, с.н.с., ОАО РТИ, к.ф.-м.н., vinogradov@rti-mints.ru.

Лобов Евгений Михайлович – с.н.с., ФГОБУ ВПО МТУСИ, к.т.н., доцент, lobov@srd.mtuci.ru.

Теохаров Александр Нарциссович – нач. сектора, ОАО РТИ, к.ф.-м.н., ateokharov@rti-mints.ru.

этих искажений может полностью разрушить сигнал при его обычной согласованной обработке (со спектральной функцией, пропорциональной комплексно сопряженной спектральной функции излученного сигнала).

При известном значении ТЕС вдоль траектории сигнала можно модифицировать обработку, согласовав ее не с излученным, а с ожидаемым сигналом путем коррекции фазы каждой гармоники согласованного фильтра.

Ранее предлагалось проводить оценку ТЕС на основе измерений параметров ионосферы с помощью разнородных средств (ионозондов, датчиков навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС), радиолокационных станций некогерентного рассеяния) и оперативной обработки измеренных и модельных данных. Такие оценки требуют тонкой настройки измерительных средств и больших ресурсов при обработке в реальном времени.

В работе [3] для оценки ТЕС предлагается обрабатывать принимаемый сигнал в линейке согласованных фильтров, настроенных на последовательность значений ТЕС с определенным шагом вблизи выбранного начального значения. Недостатком предложенного метода является использование большого числа модифицированных согласованных фильтров для обработки широкополосного сигнала, что затрудняет оценку ТЕС и дальнейшую обработку принятого сигнала в реальном времени.

В данной работе для прямой оценки ТЕС по принимаемому радиолокационному сигналу предлагается использовать методику, обобщающую известный двухчастотный метод оценки ТЕС [1] на сверхширокополосные сигналы. Для этого формируются фильтры, согласованные с «высокочастотным» и «низкочастотным» участками спектра, и ТЕС определяется по отличию задержек откликов таких фильтров.

В разделе 1 и приводится оценка дисперсионных искажений сигналов в ионосфере; в разделе 2 описано их влияние на согласованную обработку принятого сигнала и построен оптимальный фильтр, согласованный с ионосферными искажениями; в разделе 3 предложена методика прямой оценки ТЕС и условий ее применимости; в разделе 4 приведены результаты численного моделирования. В заключении сделаны основные выводы и поставлены дальнейшие задачи.

1. ОЦЕНКА ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Будем считать, что излученный радиолокационной станцией (РЛС) сигнал можно представить в виде

$$s(t) = A(t)e^{-i\omega_0 t}, \quad (1)$$

где выделена несущая частота $\omega_0 = 2\pi F_0$,

$$A(t) = \int g(\Omega)e^{-i\Omega t} d\Omega \quad (2)$$

– комплексная огибающая сигнала, которая описывается спектром $g(\Omega)$, Ω – девиация частоты, при этом $g(\Omega) \approx 0$ при $|\Omega| > \Omega_m$, $\Omega_m = \pi \Delta F$ – полуширина спектра огибающей.

Диэлектрическая проницаемость земной атмосферы отличается от единицы,

$$\varepsilon = 1 + \nu(\mathbf{r}, \omega), \quad (3)$$

где $\nu(\mathbf{r}, \omega)$ – малая поправка, зависящая от координат и частоты. Поэтому при распространении через нее фаза каждой гармоники этого сигнала (на частоте $\omega = \omega_0 + \Omega$) приобретает дополнительный сдвиг $\varphi(\omega)$, который в приближении геометрической оптики имеет вид [1]

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega}{c} L(\omega), \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме,

$$L(\omega) = \frac{1}{2} \int_0^R \nu(\mathbf{l}\sigma, \omega) d\sigma \quad (5)$$

– фазовый путь, а интегрирование ведется вдоль спрямленного луча РЛС – лоцируемый объект, направление которого задается единичным вектором $\mathbf{l} = \mathbf{R}/R$ (\mathbf{R} – радиус-вектор объекта). Рассеянный объектом сигнал приобретает такой же фазовый сдвиг¹. В результате поправка к фазе каждой гармоники сигнала, принимаемого РЛС, равна $2\varphi(\omega)$.

В ионосфере поправка к диэлектрической проницаемости прямо пропорциональна электронной концентрации $N(\mathbf{r})$ и обратно пропорциональна квадрату частоты

$$\nu(\mathbf{r}, \omega) = -\frac{80,8}{F^2} 10^{-12} N(\mathbf{r}), \quad (6)$$

где частота $F = \omega/(2\pi)$ измеряется в МГц, а электронная концентрация $N(\mathbf{r})$ – в м^{-3} .

Фазовый путь $L(\omega)$ также обратно пропорционален квадрату частоты и пропорционален полному электронному содержанию ионосферы вдоль луча

$$\begin{aligned} \text{ТЕС} &= \int_0^R N(\mathbf{l}\sigma) d\sigma: \\ L(\omega)[\text{м}] &= -\frac{40,4}{F^2[\text{МГц}^2]} 10^4 \text{ТЕС} [\text{ТЕСУ}], \end{aligned} \quad (7)$$

где ТЕС измеряется в ТЕСУ ($1 \text{ТЕСУ} = 10^{16} \text{эл/м}^2$). Ионосферная фазовая поправка в соответствии с (4) обратно пропорциональна частоте и прямо пропорциональна фазовому пути на несущей частоте $L(\omega_0)$:

$$\varphi(\omega_0 + \Omega) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Omega} \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0). \quad (8)$$

Удобно представить ее в виде трех слагаемых (выделив постоянный и линейный по Ω члены)

$$\varphi(\omega_0 + \Omega) = \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0) - \frac{\Omega}{c} L(\omega_0) + \frac{\Omega^2}{\omega_0(\omega_0 + \Omega)} \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0). \quad (9)$$

¹ Здесь мы пренебрегаем доплеровским сдвигом частоты, возникающим при рассеянии на движущихся объектах.

Первое слагаемое представляет собой поправку к фазе сигнала на несущей частоте, второе соответствует групповой задержке, а третье описывает искажение формы комплексной огибающей.

Действительно, в случае квазимонохроматической радиолокации, когда спектр сигнала достаточно узок, последним слагаемым в разложении фазовой поправки можно пренебречь, и принимаемый сигнал от объекта, отстоящего от РЛС на расстояние R , оказывается неискаженным:

$$s(t) = \frac{e^{-i\omega_0 t + 2ik_0[R+L(\omega_0)]}}{R^2} \int g(\Omega) e^{-i\Omega[t-2R/c-2L(\omega_0)]} d\Omega. \quad (10)$$

Очевидно, это можно сделать, если удвоенное третье слагаемое в меньше $\pi/8$. Для относительной полуширины спектра $\Delta = \Omega_m/\omega_0$. Это условие дает

$$\frac{\Delta^2}{1 + \Delta} < \frac{3}{64640} \frac{F_0[\text{МГц}]}{\text{ТЕС} [\text{TECU}]}. \quad (11)$$

Рассчитанная по неравенству максимальная полоса сигнала ΔF_0 , при которой дисперсионными искажениями формы сигнала можно пренебречь, приведена на рис. 1 для несущих частот от 150 до 4000 МГц. Числа у кривых указывают величину ТЕС, для которой данная кривая рассчитана.

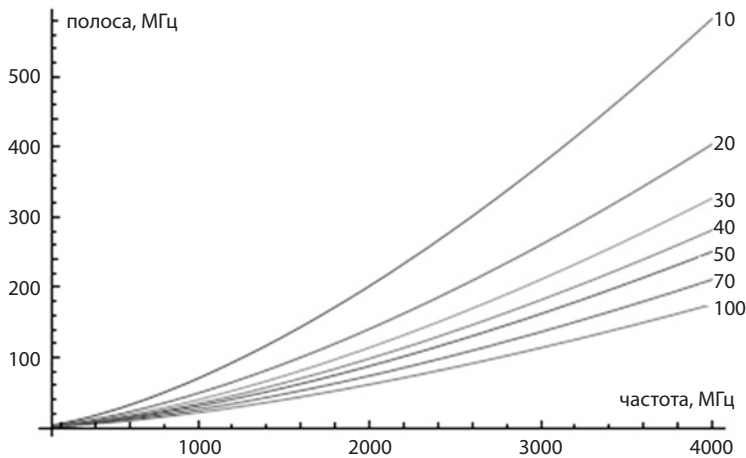


рис. 1. Допустимая полоса сигнала в зависимости от несущей.

2. ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА СОГЛАСОВАННУЮ ОБРАБОТКУ И ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

С учетом дисперсионных искажений в ионосфере принимаемый сигнал в соответствии с (1), (2) и (9) описывается формулой

$$s(t) = \frac{e^{2i\frac{\omega_0}{c}[R+L(\omega_0)]-i\omega_0 t}}{R^2} \int g(\Omega) e^{2i\frac{\Omega}{c}[R-L(\omega_0)]-i\Omega t} e^{2i\frac{\Omega^2}{\omega_0(\omega_0+\Omega)}\frac{\omega_0}{c}L(\omega_0)} d\Omega. \quad (12)$$

Известно, что оптимальная обработка принимаемого сигнала состоит в его фильтрации в согласованном фильтре, частотная характеристика которого совпадает с комплексно сопряженным спектром сигнала [4, 5].

Обычно предполагается, что спектр принимаемого сигнала близок к спектру излученного сигнала, и частотная характеристика фильтра $G(\Omega)$ согласуется с комплексно сопряженным спектром излученного сигнала: $G(\Omega) = g^*(\Omega)$. При таком подходе сигнал на выходе согласованного фильтра будет описываться формулой (12), в которой спектр сигнала $g(\Omega)$ нужно заменить его квадратом модуля $|g(\Omega)|^2$.

Для оценки влияния ионосферных искажений применим последнее выражение к сигналу с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ-сигнал) и фазоманипулированному шумоподобному импульсному сигналу с кодовой манипуляцией импульсов на основе M-последовательности (ШПС-сигнал) с параметрами, при которых явно сказываются рассматриваемые эффекты, например, длительностью $T = 5$ мкс, несущей частотой $F_0 = \omega_0/(2\pi) = 1300$ МГц и шириной спектра $\Delta F = \Delta\omega/(2\pi) = 200$ МГц. Амплитуда сигнала на выходе согласованного фильтра, рассчитанная относительно момента времени $t = 2R/c$ (в этом случае сигнал должен быть максимален), для разных значений ТЕС и показана на рис. 2 (а – для ЛЧМ, б – для ШПС).

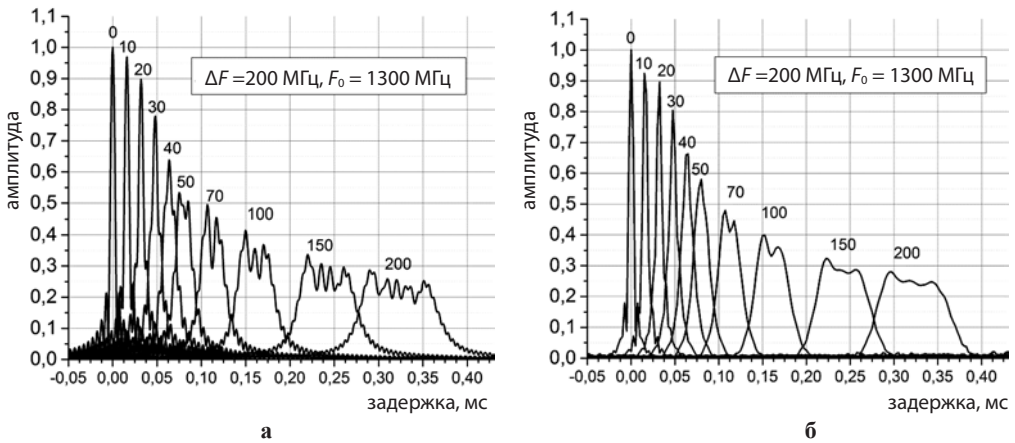


рис. 2. Амплитуда сигнала на выходе согласованного фильтра для ТЕС = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150 и 200 TECU.

Графики амплитуд на выходе согласованных фильтров показывают, что с увеличением ТЕС увеличивается задержка сигнала, снижается максимальное значение его амплитуды и увеличивается ширина отклика. Разрешающая способность сигнала по задержке ухудшается вдвое уже при $TEC = 20$ TECU, и, следовательно, традиционная обработка сверхширокополосного сигнала становится бессмысленной и возникает потребность в разработке фильтра, согласованного с ожидаемым сигналом.

Спектральная функция оптимального фильтра, компенсирующего ионосферные искажения сигнала,

$$G(\Omega) = g^*(\Omega) \exp\left[2i \frac{\Omega}{c} L(\omega_0)\right] \exp\left[-2i \frac{\Omega^2}{\omega_0(\omega_0 + \Omega)} \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0)\right]. \quad (13)$$

учитывает как групповое смещение (первый экспоненциальный множитель), так и уширение отклика (второй экспоненциальный множитель).

Для построения спектральной функции (13) необходимо знать фазовый путь в ионосфере на несущей частоте $L(\omega_0)$, который в свою очередь зависит от ТЕС. Такая коррекция требует знания ТЕС ионосферы, измерение и оценка которого является непростой задачей. Например, измерения ТЕС двухчастотным методом с использованием сигналов от ИСЗ навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС) требует точной калибровки фаз, измерения параметров ионосферы ионозондами дают фрагментарные оценки значений ТЕС на направлениях, формируемых конфигурацией расположения передатчиков и приемников ионозондов, радиотомографические методы [6] для устойчивой оценки должны использовать большой объем оперативных данных от измерительных средств (ионозондов, датчиков навигационных систем,...) и требуют больших ресурсов при обработке в реальном времени.

3. МЕТОДИКА ПРЯМОЙ ОЦЕНКИ ТЕС

Для построения спектральной функции (13) необходимо знать задержку сигнала, вносимую ионосферой

$$\Delta t = \frac{2L(\omega_0)}{c} = \frac{8080}{3} \cdot \frac{\text{ТЕС}}{F_0^2}. \quad (14)$$

Эта задержка зависит от двух параметров – полного электронного содержания ионосферы ТЕС, характеризующего степень ионосферного возмущения, и несущей частоты сигнала F_0 .

В данной работе для прямой оценки ТЕС предлагается использовать зависимость «ионосферной» задержки принятого сигнала от частоты (14). Если сигнал имеет достаточно широкую полосу частот ΔF (сверхширокополосный сигнал), то можно использовать спектральные компоненты сигнала на краях полосы, которые будут испытывать разные задержки, поскольку «несущие» этих крайних компонент будут разными. Указанная методика ранее успешно применялась в декаметровом диапазоне при оценке параметров частотной дисперсии ионосферного радиоканала с помощью фазоманипулированных шумоподобных сигналов [7, 8].

Аргументом использования предложенной методики является то обстоятельство, что «крайние» спектральные компоненты сами по себе могут иметь ширину полосы значительно меньшую, чем у исходного широкополосного сигнала, и потому существенно меньше подвержены ионосферным искажениям и допускают согласованную обработку без компенсации ионосферных искажений. С другой стороны, уменьшение ширины полосы приводит к уширению главного пика на выходе согласованного фильтра и снижению точности оценки задержки. Поэтому при выборе оптимального формирования «крайних» спектральных компонент необходим компромисс.

На рис. 3 схематично показан график модуля спектра сигнала $|g(\Omega)|$ с несущей F_0 и полосой ΔF . «Левая» или «низкочастотная» компонента сигнала фор-

мируется полосовым фильтром из части спектра с частотами, меньшими фиксированной частоты $F_{л}$ ($F < F_{л}$) и имеет несущую $F_{ол} < F_0$, тогда как «правая» или «высокочастотная» компонента – из правой части спектра с частотами, большими, чем фиксированная частота $F_{п}$ ($F > F_{п}$) с несущей $F_{оп} > F_0$.

При независимой обработке «правого» и «левого» сигнала и измерения соответствующих «ионосферных» задержек $\Delta t_{л}$ и $\Delta t_{п}$ согласно (14) можно получить оценку ТЕС по разности задержек $\Delta t_{лп} = \Delta t_{л} - \Delta t_{п}$:

$$TEC = \frac{3}{8080} \cdot \Delta t_{лп} \cdot \left[\frac{1}{F_{ол}^2} - \frac{1}{F_{оп}^2} \right]^{-1}. \quad (15)$$

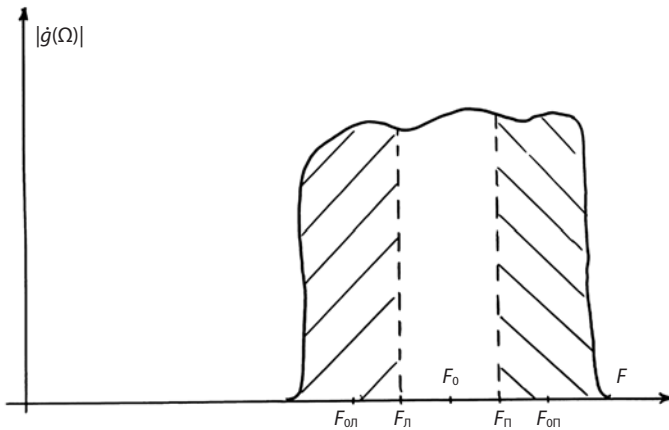


рис. 3. К выбору «низкочастотной» и «высокочастотной» компонент сигнала.

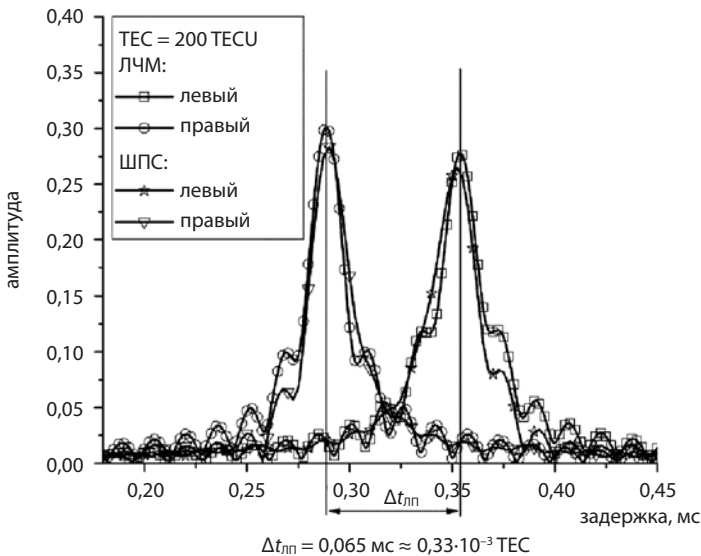


рис. 4. Задержки распространения «левой» и «правой» частей спектра сигнала, измеренные с помощью согласованных на соответствующие части спектра фильтров.

Оценим возможность реализации предложенной методики прямой оценки ТЕС. Для определенности разделим спектр исходного сигнала на три интервала одинаковой ширины. Тогда $F_{0л} \approx F_0 - \Delta F/3$ и $F_{0п} \approx F_0 + \Delta F/3$. Для модельных значений $F_0 = 1300$ МГц и $\Delta F = 200$ МГц выражение (15) приводит к оценке $\Delta t_{лп} \approx 0,33 \cdot 10^{-3}$ ТЕС.

Для возмущенной ионосферы с ТЕС = 50 имеем $\Delta t_{лп} \approx 0,016$ мкс, что приблизительно совпадает с шириной пика функции отклика при обработке сигнала «левым» и «правым» фильтрами с полосой $\Delta F/3 = 67$ МГц: $\Delta \tau_{л} = \Delta \tau_{п} = 0,015$ мкс. Это приблизительно соответствует критерию Рэлея для разрешающей способности и дает возможность с достаточной точностью определить разность задержек и провести прямую оценку ТЕС по формуле (15).

На рис. приведены сигналы с выхода фильтров, согласованных с «левой» и «правой» частями спектра исходного сигнала. Измеренное значение разницы задержки распространения соответствует расчетному для ТЕС = 200 ТЕСУ.

Блок-схема алгоритма, реализующего предложенную методику прямой оценки ТЕС, приведена на рис. 5. Здесь использовано обозначение для ступенчатой функции $\theta(f) = 1$ при $F > 0$ и $\theta(f) = 0$ при $F < 0$.

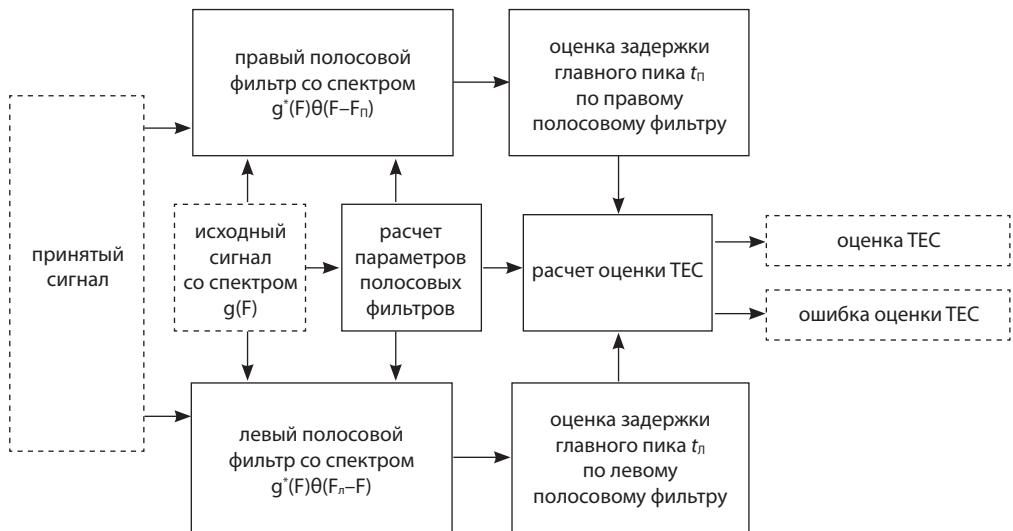


рис. 5. Блок-схема алгоритма прямой оценки ТЕС.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки возможности определения полного электронного содержания ионосферы предложенным методом была разработана компьютерная программа.

В качестве примера на рисунках ниже приведены результаты моделирования оценки ТЕС для ЛЧМ-сигнала длительностью 10 мкс и полосой 250 МГц с центральной несущей частотой 1,3 ГГц, статистическая выборка для каждой оценки составляла 1000 измерений.

Оценки ТЕС приведены для заданных значений возмущений ионосферы: ТЕС = 20 (слабо возмущенная ионосфера), ТЕС = 50 (возмущенная ионосфера) и ТЕС = 100 (сильно возмущенная ионосфера).

На рис. 6 приведены графики оценки ТЕС с расширениями $\pm 3\sigma$ в зависимости от относительного уровня шума (отношения шум/сигнал по амплитуде) при доле вырезания центральной части спектра, равной 0,33. Здесь σ – среднеквадратичное отклонение оценки ТЕС по ансамблю.

С ростом шумовой компоненты разброс оценок ТЕС растет, хотя вплоть до отношения шум/сигнал = 24 (–13,8 дБ) оценка оказывается более чем удовлетворительной для многих приложений. При отношении шум/сигнал > 25 (–13,9 дБ) моделирование показывает значительный рост выбросов на статистическом ансамбле и, по нашему мнению, такая оценка оказывается неприемлемой, поскольку в реальных условиях мы должны ориентироваться на ограниченное число выборок принятого сигнала (в идеале – на одну реализацию сигнала на приеме).

прямая оценка ТЕС (ЛЧМ-сигнал, длительностью 10 мкс и полосой 250 МГц),
размер выборки: 1000

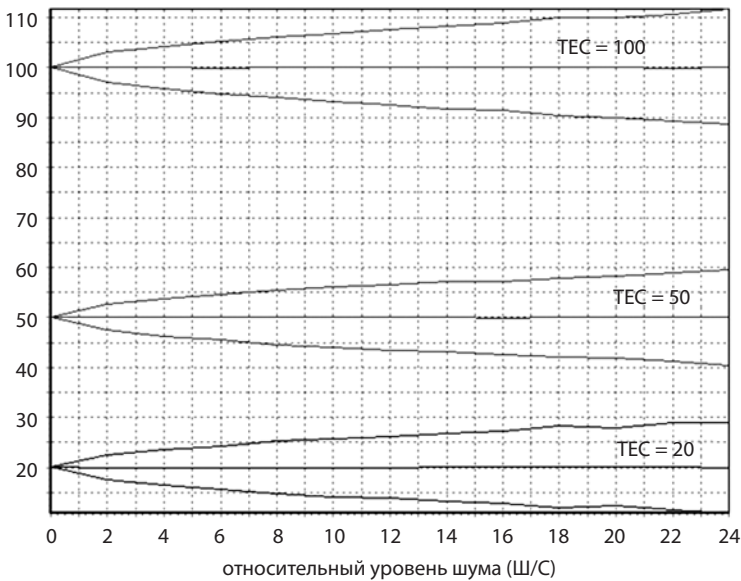


рис. 6. Статистика прямой оценки ТЕС в зависимости от отношения шум/сигнал.

На рис. 7 приведены графики оценки ТЕС с расширениями $\pm 3\sigma$ в зависимости от доли вырезания центральной части спектра при формировании фильтров для достаточно высокого отношения шум/сигнал, равного 20 (–13 дБ).

Видно, что существует оптимальная область для формирования крайних фильтров с вырезанием примерно 1/3 части спектра сигнала в районе несущей частоты, по крайней мере для сильно возмущенной ионосферы. В этом случае разброс оценок оказывается приемлемым для многих приложений. Для области сильного «вырезания центра спектра» (>0,7) крайние фильтры оказываются узко-

прямая оценка ТЕС (ЛЧМ-сигнал, длительностью 10 мкс и полосой 250 МГц, Ш/С = 20), размер выборки: 1000

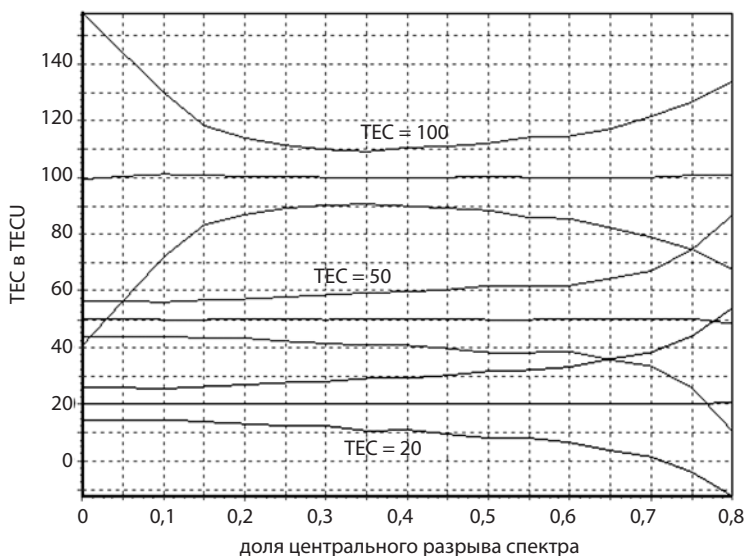


рис. 7. Статистика прямой оценки ТЕС в зависимости от разрыва спектра.

полосными, что приводит к значительному уширению главных пиков откликов и соответственно к ухудшению разрешения. Кроме того, усиливается шумовая компонента из-за сужения полос крайних фильтров. В другой области слабого «вырезания» ($< 0,15$) или даже перекрытия спектров фильтров (< 0) сказывается сближение эффективных несущих, что ухудшает характеристики оценки разности задержек в крайних фильтрах.

Кроме того, при слабом вырезании парциальные сигналы становятся сверхширокополосными и заметно искажаются при распространении через ионосферу (особенно для сильно возмущенной ионосферы), что также ухудшает оценку разности задержек.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана принципиальная возможность прямого измерения полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) по данным зондирования сверхширокополосным сигналом в реальном времени.
2. Предложенная методика дает возможность оценивать ТЕС по единичному отклику принятого зондирующего сигнала без дополнительного лоцирования и без использования дополнительных измерительных средств (таких как ионозонды, датчики навигационных систем, станции некогерентного рассеяния).
3. Предложенная методика не зависит от вида сверхширокополосного сигнала; показано, что она работает для ЛЧМ-сигналов и широкополосных фазоманипулированных сигналов.

4. Предложенная методика удовлетворительно работает при малых отношениях сигнал/шум на входе приемника – вплоть до -13 дБ (зависит от базы сигнала).
5. Показано, что существуют оптимальные параметры формирования парциальных фильтров.
6. Оценка ТЕС непосредственно по принимаемому сигналу позволяет синтезировать адаптивные следящие фильтры, оптимизирующие собственную частотную характеристику при изменении ТЕС вдоль радиолинии в течение сеанса связи (например, во время связи с низкоорбитальным искусственным спутником Земли при движении его по орбите). Корректировка дисперсионных искажений принимаемого сигнала позволит повысить помехоустойчивость радиолинии.
7. Статистическое распределение оценок ТЕС близко к гауссову (эксцесс менее 0,1, а отношение 4-го момента ко 2-му близко к 3).
8. Необходимо продолжить работу по дальнейшему исследованию и совершенствованию предложенной методики, в частности, по выбору оптимальных параметров обработки в зависимости от излученного сигнала и по особенностям оценки ТЕС в условиях отражения от сложного объекта. Необходимо также учесть движение объекта, приводящее к доплеровскому сдвигу гармоник принимаемого сигнала.
9. Необходимо рассмотреть варианты применения предложенной методики в перспективных и разрабатываемых локаторах, использующих сверхширокополосные сигналы в задачах дистанционного зондирования и в связных задачах, с целью построения оптимальной обработки принятых сигналов в условиях их искажения в каналах распространения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
- [2] *Виноградов А.Г., Лучин А.А., Теохаров А.Н.* Обработка сверхширокополосных сигналов и формирования радиолокационных изображений в РЛС дальнего обнаружения L-диапазона // *Наукоемкие технологии.* 2013. Т. 14. № 9. С. 32-36.
- [3] *Виноградов А.Г., Теохаров А.Н.* Прямая оценка полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) по искажениям широкополосного радиолокационного сигнала. // Тезисы докладов на международной конференции «Метод функций Ляпунова и его приложения», Алушта, 2014, 15-20 сент. С. 80.
- [4] *Сосулин Ю.Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
- [5] Теоретические основы радиолокации. / Под ред. Ширмана Я.Д. М.: Сов. радио, 1970.
- [6] *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Нестеров И.А.* Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // *Успехи физических наук.* 2010. Т. 180, № 5, С. 548-553.

- [7] *Аджемов С.С., Лобов Е.М., Косилов И.С.* Экспериментальная оценка параметров частотной дисперсии ионосферного канала с помощью широкополосного фазоманипулированного сигнала // *Материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникация» (СИНХРОИНФО-2013)*, 30 июня – 3 июля 2013 г., Ярославль / под ред. д.т.н. проф. А.В. Пестрякова. – М.: ООО «Брис-М», С. 199-201.
- [8] *Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Косилов И.С., Елсуков Б.А.* Методика оценки параметров частотной дисперсии ионосферного канала с помощью широкополосного фазоманипулированного сигнала // *T-Comm – Телекоммуникации и транспорт*. № 9, 2014, С. 49-53.

DIRECT EVALUATION OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) OF IONOSPHERE BY SPECIAL PROCESSING WIDEBAND RADAR SIGNAL

S.S. Adjemov², A.G. Vinogradov¹, E.M. Lobov², A.N. Teokharov¹

¹ Joint Stock Company «Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute» (JSC RTI)

² Moscow Technical University of Telecommunication and Informatics (MTUCI)

Analysis of dispersion distortions of wideband radar signals propagating through Earth's ionosphere is given. A technique based on special processing of received wideband signal is developed to evaluate the total electron content of ionosphere along the radar beam and mitigate dispersion distortions.

Keywords: total electron content, dispersion distortion, wideband radar signal, matched filtering, radiolocation.

Adjemov Sergey – head of department, MTUCI, doctor of technical sciences, professor, adjemov@srd.mtuci.ru.

Vinogradov Alexander – head of division, senior scientist, JSC RTI, candidate of science in physics and mathematics, vinogradov@rti-mints.ru.

Lobov Evgeny – senior researcher, MTUCI, candidate of technical sciences, docent, lobov@srd.mtuci.ru.

Teokharov Alexander – head of subdivision, JSC RTI, candidate of science in physics and mathematics, ateokharov@rti-mints.ru.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ И КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

С.Ю. Хабибулин², А.М. Мёрзлый¹, В.Н. Филатов³, А.С. Шевляков⁴

- ¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва
- ² Центральное специализированное конструкторское бюро
Открытого акционерного общества «РТИ» (ЦСКБ ОАО «РТИ»), г. Москва
- ³ Открытое акционерное общество «Концерн «Радиотехнические и информационные системы» (ОАО «Концерн «РТИ Системы»), г. Москва
- ⁴ Акционерное общество Научно-техническое производственное
предприятие «Комплексное развитие технологий» (АО НТПП «КРТ»), г. Москва

В статье рассматриваются проблемные вопросы оперативной оценки и краткосрочного прогноза геофизической обстановки в арктической зоне в интересах развития систем топогеодезического и навигационного обеспечения РФ. Контроль фактического состояния гелиогеофизических условий в арктической зоне в режиме реального времени и его краткосрочный прогноз становятся все более актуальной проблемой для решения прикладных задач в интересах различных министерств и ведомств. Рассмотрены возможные подходы к оперативной оценке и краткосрочному прогнозу условий функционирования рассматриваемых систем в арктической зоне, проанализированы их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: оперативная оценка, краткосрочный прогноз, ионосфера, арктическая зона.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных составляющих космической погоды является состояние ионосферы и связанной с ней магнитосферы. Состояние полярной ионосферы и процессы, протекающие в ней, влияют на эффективность функционирования систем связи, локации, спутниковой навигации, геодезии и др. Это приводит к снижению достоверности информации, формируемой на основе данных, получаемых сложными техническими средствами и системами и снижению вероятностных характеристик обнаружения различных объектов на изменяющемся фоне. Кроме того, изменения условий в ионосфере влияют на состояние технологических объектов (трубопроводы, энергетические системы и др.). Например, по оценкам специалистов в области спутниковой геодезии [5], к сожалению, не все факторы влияния ионосферы (правая часть рис. 1) на результаты спутниковых определений поддаются компенсации (рис. 1) даже после привлечения в обработку данных соответствующих моделей.

Хабибулин Сергей Юрьевич – с.н.с., ЦСКБ ОАО РТИ, к.т.н., SKhabibulin@oaorti.ru.

Мёрзлый Алексей Михайлович – с.н.с., отдел физики космической плазмы ИКИ РАН, к.т.н., pinega@list.ru.

Филатов Валерий Николаевич – исполнительный директор-руководитель Комплекса «Геоинформатика» ОАО «Концерн «РТИ Системы», Почетный геодезист, генерал-лейтенант запаса, действительный член Академии военных наук, действительный член Академии инженерных наук РФ, доктор военных наук, профессор, vfilatov@oaorti.m.

Шевляков Антон Сергеевич – инженер-программист второй категории, АО НТПП «КРТ», shevlyakovas@mail.ru.

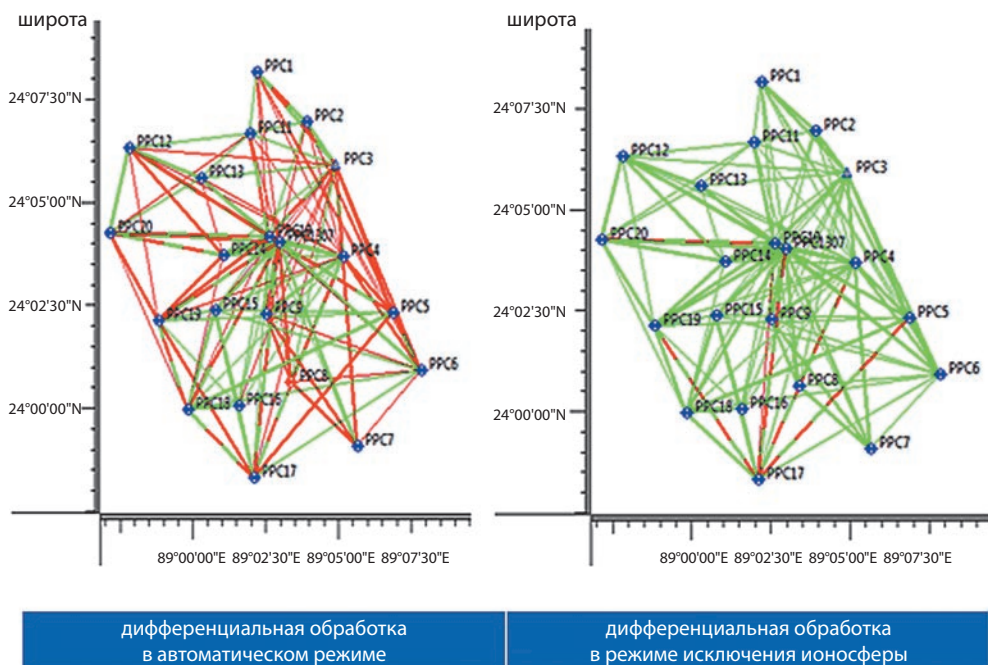


рис. 1. Влияние ионосферных возмущений на геодезические наблюдения

Таким образом, оперативная оценка гелиогеофизических условий функционирования различных систем в арктической зоне в реальном режиме времени и их краткосрочный прогноз с учетом отображения картографическими средствами границ зон максимального воздействия становится все более актуальной проблемой для решения прикладных задач [1, 2, 3, 5].

Наибольший прикладной интерес представляют физические процессы, протекающие в ионосфере и верхней атмосфере. Они являются составной частью единой среды околоземного и межпланетного пространства, включающего взаимодействие Солнечного ветра с магнитосферой, динамику магнитосферы, связи с мезосферой и стратосферой. Следует подчеркнуть, что хотя за последнее десятилетие понимание физики процессов в околоземной плазме значительно возросло, но далеко не все аспекты взаимодействия отдельных сред объяснены и для прогресса в этом направлении требуются дальнейшие теоретические исследования и эксперименты.

Авроральная зона в обычных условиях расположена примерно на 65–75° магнитной широты, отсчитываемой относительно магнитного экватора. Энергия, поступающая из солнечного ветра, не расходуется равномерно, а может накапливаться в виде энергии магнитного поля (или, что то же самое, в виде энергии электрических токов) в магнитосфере. Через некоторое время происходит внезапная разрядка, энергия сбрасывается частично обратно в солнечный ветер, частично в атмосферу. Это так называемый цикл геомагнитной суббури,

он порождает при разрядке всплеск полярных сияний и геомагнитных вариаций в полярных районах и происходит каждые несколько часов. Во время аномальных возрастаний давления солнечного ветра, после солнечных вспышек, зона активности распространяется «глубже» в магнитосферу, в результате чего авроральный овал, ее отражение, спускается на более низкие широты. Геомагнитные вариации наблюдаются по всей Земле. Такое событие называется магнитной бурей. Суббури тоже становятся особенно сильными, полярные сияния могут наблюдаться на низких широтах [6].

Механизм полярных сияний – наиболее известного проявления космической погоды, до сих пор до конца не ясен и, более того, эта проблема считается одной из самых значимых в космической физике. Оценки показывают, что даже если «вытряхнуть» всю плазму магнитосферы в атмосферу, то поток и энергия электронов будут недостаточны, чтобы добиться наблюдаемой яркости сияния (в ярких дугах яркость доходит до сотен килорелей, при визуальном пороге обнаружения около одного килореля) и наблюдаемой глубины проникновения электронов в атмосферу до высоты 100 км. Электроны в хвосте магнитосферы имеют энергию 100–1000 эВ, а для возбуждения полярных свечений она должна быть на порядок больше, около 1–10 кэВ. За доускорение электронов отвечает так называемый «авроральный ускоритель» – зона в магнитосфере на высотах в несколько тысяч км над авроральным овалом. Ускорение происходит в достаточно малых пространственных зонах – поперечный размер одной дуги сияния может составлять порядка одного километра (и иногда дуга расслаивается даже на более мелкие слои толщиной порядка сотни метров).

Концентрация электронов в ионосфере (появляющихся в результате такой ионизации) определяет проводимость ионосферы. В момент внезапного начала суббури, часть токов магнитосферы ответвляется в ионосферу, происходит своего рода «закорачивание» магнитосферной электрической цепи, позволяющее сбросить часть накопленной энергии. Ключевым моментом является то, что все вышеперечисленные эффекты авроральной активности не независимы. Это классическая схема с положительной обратной связью, которая потенциально и может объяснить наличие некоторого порога, обеспечивающего реализацию цикла накопления и сброса энергии. Однако момент начала суббури и ее интенсивность практически мало предсказуемы.

Таким образом, остаются открытыми следующие фундаментальные аспекты гелиогеофизики арктической зоны [3]:

- механизмы накопления и сброса энергии с хвоста магнитосферы в полярную ионосферу, формирующие пространственно-временную схему возмущений в полярной ионосфере;
- механизмы ускорения над ионосферой на высотах 12000–3000 км энергичных протонов и электронов, высыпающих из магнитосферы и непосредственно создающих ионизацию полярной ионосферы
- пространственно-временные характеристики и механизмы формирования мелкомасштабных структур авроральных свечений как отражения мгновенной картины состояния ионосферы.

Анализ работы различных систем в арктической зоне, научных исследований, руководящих документов по развитию Арктики показал, что основными проблемами оперативной оценки и краткосрочного прогноза в геофизических условиях функционирования являются:

- отсутствие согласованной концепции геофизического обеспечения потребителей (космос, связь, РЛС) в Арктике;
- недостаточное количество средств наблюдения за геофизической обстановкой в Арктике (Росгидромет, РАН, МО РФ, МЧС и др.), отсутствие их оперативного взаимодействия;
- отсутствие системности в информации и низкая оперативность ее поступления, ее недостаточный состав для уточнения действующих моделей и оперативной оценки и прогноза влияния изменений геофизических условий на работу различных систем;
- использование данных иностранных сетей (до настоящего времени большинство современных отечественных источников информации по космической погоде (ИПГ, ИКИ, ИЗМИРАН, ИСЗФ СОРАН), демонстрирующих оценки гелиогеофизической обстановки, как правило, используют данные наблюдений и прогнозы, получаемые с сайтов зарубежной сети. Это лишает отечественную гелиогеофизическую службу автономности и делает ее зависимой от доступа к данным, который может быть прерван в любой момент. Ряд данных доступен только для ретроспективного анализа, в то время как зарубежные исследователи имеют доступ к данным реального времени. Расчет различных планетарных геомагнитных и геофизических индексов проводится в настоящее время в основном на основании зарубежных экспериментальных данных, либо просто копируется с зарубежных сайтов);
- недостаточная адаптация существующих моделей геофизических процессов (в основном ионосферные модели SIMP-2 – разработка ИПГ, иностранные – IRI и др.) для решения конкретных прикладных задач в арктической зоне (физика полярной зоны);
- вопрос размещения средств мониторинга гелиогеофизической обстановки Росгидромета слабо увязан с планами развертывания систем локации, связи и др.;
- отсутствие перекрытия зон ответственности наземных средств, ситуационного прогноза прохождения КА над районами трасс связи, КВ – локации и зонами диагностики геофизических датчиков, разная чувствительность сложных технических средств и систем и геофизической службы к изменениям параметров среды, а также отсутствие паспортизации, стандартизации большинства средств и единой формы представления данных;
- отсутствие организации информационного взаимодействия, проработки единого интерфейса и структуры данных, алгоритмов их обработки и требуемого модельного ряда среды, адаптируемой к конкретным системам (РЛС, навигации, связи и др.), районам их развертывания и решаемым задачам;
- не решен вопрос методического обеспечения программно-аппаратных комплексов, создаваемых разработчиками сложных технических средств и си-

стем в инициативном порядке в интересах самообеспечения своих изделий в реальном масштабе времени геофизической информацией в интересах снижения негативного влияния среды на выходные характеристики сложных технических средств в процессе их работы.

В ближайшие годы в соответствии со «Стратегией деятельности в области гидрометеорологии...» на основе развития сохранившейся фундаментальной школы специалистов и готовящихся проектов намечено развертывание в РФ системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации, которое включает и установку в различных районах более сотни ионозондов. В рамках ФЦП «Геофизика» предусмотрено построение перспективной орбитальной конфигурации из пяти малых КА «Ионосфера», запуск которых намечен на 2019–2020 гг. Кроме Росгидромета конкретную информацию об ионосфере могут выдавать по запросам и организации других министерств и ведомств: РАН (ИКИ, ИЗМИРАН, ИПГ, ИДГ), МО РФ и др. в рамках прогнозов параметров [3].

Одним из ключевых прикладных аспектов гелиогеофизики полярной зоны является создание и практическое применение оперативных и прогностических моделей динамического состояния ионосферы-магнитосферы и распространения радиоволн в интересах сложных технических систем. Для их внедрения необходимо решить ряд задач.

- Разработать оперативные и прогностические модели влияния радиофизических характеристик ионосферы/магнитосферы на работоспособность сложных технических систем.
- Учитывая наличие и использование оперативных моделей разного уровня и разной степени проработки различными организациями, необходимо создание рабочей группы с участием разработчиков моделей, разработчиков технических средств и представителей заказчика для анализа моделей и создания или выбора оптимальной модели (оптимальных моделей).
- Провести верификацию выбранных моделей в геофизических обсерваториях/полигонах и с использованием реальных технических средств. На основании результатов верификации провести коррекцию оперативных моделей с помощью наземных средств мониторинга ионосферы.
- Организовать наземный эксперимент по оценке радиофизических характеристик ионосферы в реальном масштабе времени.
- Определить и организовать полигоны и средства мониторинга ионосферы в интересах решения поставленных задач. В том числе необходимо использовать для мониторинга штатные радиолокационные средства в специальных режимах функционирования.
- Провести разработку адаптивных моделей поведения ионосферы-магнитосферы с использованием данных наземного мониторинга.
- Разработать и запустить специализированные спутники по исследованию динамических характеристик ионосферы-магнитосферы с возможностью использования данных, полученных в реальном масштабе времени, в адаптивных и прогностических моделях. В конечном итоге адаптировать моде-

ли окружающего космического пространства для решения прикладных задач в Арктике.

- Организовать постоянный наземный и космический мониторинг динамического состояния ионосферы с измерением радиофизических характеристик, необходимых для адаптивных и прогностических моделей [3].

Кроме того, необходимо решить ряд организационных и технических вопросов:

- создание межведомственного комитета по геофизическим проблемам в Арктике (на базе ГМС ВС РФ);
- разработку концепции геофизического обеспечения в Арктике с корректировкой всех ведомственных программ по геофизическому мониторингу (ФЦП «Геофизика-2», НИОКР ОАО «РТИ», НИОКР ОАО «НПК НИИДАР», Газпром...);
- разработку и производство типового средства геофизического мониторинга, концепция его размещения в Арктике (в качестве основы возможно использование специального программно-аппаратного комплекса разработки РТИ);
- создание единого информационного геофизического портала в Арктике, как составной части системы гидрометеорологического обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное применение существующих и перспективных методов оценки и прогноза геофизических условий функционирования различных систем в арктической зоне РФ возможно только в рамках программных мероприятий с привлечением представителей заказчика, разработчика, Росгидромета и ФАНО.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Хабибулин С.Ю., Филатов В.Н., Черкасов И.В.* Состояние и перспективы топогеодезического и навигационного обеспечения в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации. // Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО – 2015». 2015. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. С. 682-693.
- [2] *Филатов В.Н.* Современное состояние геодезической и картографической обеспеченности территории Российской Федерации и перспективы ее развития. // Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Геодезия. Маршейдерия. Аэрофотосъемка. На рубеже веков». 2015. М. URL: <http://www.con-fig.com>. С. 5-7.
- [3] *Аксенов О.Ю., Аникин В.А., Борисов Ю.А. и др.* Основы развития перспективной системы контроля фоновой обстановки в полярной ионосфере и ее краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли. // Препринт. 2015–1. М.: ЦАО – МФТИ. –31 с.
- [4] *Шевляков А.С., Андреева Д.В., Андреев Г.И.* Информационные технологии при моделировании потоков ионизирующего излучения космического пространства внутри

аппаратуры космического аппарата // Материалы XII-ой Международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (1–10 октября). 2015. НИУ ВШЕ. С. 485–486.

- [5] Андреев В.К., Хабибулин С.Ю., Черкасов И.В. Технические возможности и условия реализации технологии точного определения координат абсолютным методом космической геодезии. // Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО–2015». 2015. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. С. 660–668.
- [6] Аксёнов О.Ю., Долганов А.А., Ляхов А.Н., Мёрзлый А.М., Петрукович А.А., Оводенко В.Б., Саранченков В.А., Соколов К.С., Трёкин В.В., Якубовский С.В. Гелиогеофизика арктической зоны: фундаментальные и прикладные аспекты // Сборник РТИ, 2015.
- [7] Хабибулин С.Ю., Мёрзлый А.М., Петрукович А.А. Предложения по модернизации системы геофизического обеспечения в Арктике как составной части гидрометеорологического обеспечения. // Доклад на конференции «Технологии в Арктике», Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016.

MAIN APPROACHES TO RAPID ASSESSMENT AND SHORT TERM FORECASTS OF GEOPHYSICAL CONDITIONS IN THE ARCTIC

S.Y. Khabibulin², A.M. Mërzlyy¹, V.N. Filatov³, A.S. Sevlakovs⁴

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow, Russia

² Central Design Bureau Open Joint Stock Company «RTI» (OJSC «RTI»), Moscow, Russia

³ Joint Stock Company «Concern «RTI of System», Moscow, Russia

⁴ JSC SIE «ITR», Moscow, Russia

The article deals with the problems of rapid assessment and short-term forecasting of geophysical conditions in the Arctic for development of topogeodetic systems and navigational support of the Russian Federation. Monitoring of heliogeophysical conditions in the Arctic zone in real-time and short-term outlook is becoming more urgent problem for various ministries and departments. Possible approaches to rapid assessment and short-term forecast of operating conditions in the Arctic zone, analyzed their advantages and disadvantages.

Keywords: rapid assessment, short-term forecast, the ionosphere, the Arctic area.

Khabibulin Sergey – senior researcher, Central Design Bureau OJSC «RTI», Ph.D., SKhabibulin@oaorti.ru.

Mërzlyy Alexei Mikhailovich – senior researcher, Department of Space Plasma Physics, IKI RAN, Ph.D, pinega@list.ru.

Filatov Valery Nikolaevich – chief executive, head of the Complex «Geoinformatics» of JSC «Concern «RTI of System», honourable geodesist, lieutenant general (res.), full member of Academy of military sciences, full member of Academy of engineering sciences of the Russian Federation, D.Sci. (Mil), professor, vfilatov@oaorti.ru.

Sevlakovs Anton S. – software engineer II category, JSC SIE «ITR», shevlyakovas@mail.ru.

СИСТЕМА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

***А.М. Мёрзлый¹, А.Г. Виноградов³, А.К. Кузьмин¹, О.В. Никифоров⁶, Г.М. Крученицкий²,
А.Н. Теохаров³, В.В. Трёкин⁵, С.Ю. Хабибулин⁴***

- ¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва
- ² Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Центральная
аэрологическая обсерватория» (ФГБУ «ЦАО» Росгидромета), г. Долгопрудный
- ³ Открытое акционерное общество «Радиотехнический институт
имени академика А.Л. Минца» (ОАО РТИ), г. Москва
- ⁴ Центральное специализированное конструкторское бюро
Открытого акционерного общества «РТИ» (ЦСКБ ОАО «РТИ»), г. Москва
- ⁵ Научно-исследовательский испытательный центр (г. Москва)
Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической
обороны Минобороны России (НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО МО РФ), г. Москва
- ⁶ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва

Рассмотрены проблемные вопросы создания современной системы геофизического обеспечения (СГО) различных радиотехнических средств и систем (РТС). Представлены предложения по формированию СГО, определен перечень решаемых задач, предложения по составу и структуре системы. Предложен состав и структура специального программного обеспечения решения целевых задач по расчету ионосферных и тропосферных параметров, а также предложения по форматам представляемых данных и порядку информационного взаимодействия.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, функционирование радиотехнических средств, система геофизического обеспечения, эффективное применение технических решений, компенсация негативного влияния геофизической среды.

Мёрзлый Алексей Михайлович – с.н.с., отдел физики космической плазмы ИКИ РАН, к.т.н., pinega@list.ru.

Виноградов Александр Георгиевич – нач. отдела перспективных разработок, с.н.с., ОАО РТИ, к.ф.-м.н., vinogradov@rti-mints.ru.

Кузьмин Александр Константинович – глав. спец., отдел физики космической плазмы ИКИ РАН, к.т.н., alkuzmin@mail.ru.

Никифоров Олег Вячеславович – с.н.с., ГЦ РАН, 1002oleg@rambler.ru.

Крученицкий Григорий Михайлович – нач. отдела, ФГБУ «ЦАО» Росгидромета, д.ф.-м.н., omd@cao-rhms.ru.

Теохаров Александр Нарциссович – нач. сектора, ОАО РТИ, к.ф.-м.н., atekharov@rti-mints.ru.

Трёкин Вячеслав Владимирович – с.н.с., НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО МО РФ, к.т.н., news197@mail.ru.

Хабибулин Сергей Юрьевич – с.н.с., ЦСКБ ОАО «РТИ», к.т.н., SKhabibulin@oaorti.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Околосферное космическое пространство (ОКП) представляет собой глобальную окружающую сферу нашей планеты. В его состав входят верхняя атмосфера, ионосфера, магнитосфера с радиационными поясами. Взаимодействие его компонентов между собой вызывает сложные обменные процессы, оказывающие как непосредственное, так и опосредованное влияние на качество функционирования радиотехнических средств и систем (РТС) различного назначения.

Влияние ОКП на качество функционирования РТС различного назначения можно условно распределить на следующие основные направления:

- в определяющей роли среды как части пространства, в которой происходит распространение сигналов, излучаемых (принимаемых) средствами и системами различного назначения;
- среды как составной части внешней системы, в которой происходит функционирование средств и систем различного назначения;
- воздействие среды на людей (в частности, на обслуживающий персонал как составную часть средств и систем различного назначения).

При оценке качества работы средств различного назначения и базирования обычно рассматривают два первых направления влияния среды распространения (функционирования).

В данной работе рассмотрена система геофизического обеспечения (СГО), входящая в состав системы гидрометеорологического (геофизического) обеспечения (ГМО (ГФО)) работы РТС и состоящая из трех уровней, определены ее основные задачи, предложения по составу и структуре системы (рис. 1).

В современной радиоэлектронике в той или иной мере используются почти все волны электромагнитного спектра в диапазонах от сверхдлинных до ультрафиолетовых. Для каждого диапазона характерны свои особенности, обусловленные областью технического применения, методами генерации, излучения, приема, канализации, условиями распространения и т. д.

По условиям распространения радиоволны можно разделить на земные, тропосферные, ионосферные и прямые.

Основными механизмами взаимодействия излучения со средой являются:

- ослабление;
- рассеяние;
- поглощение;
- отражение;
- преломление (рефракция).

На условия распространения радиоволн для РТС различного назначения существенное влияние оказывают процессы, происходящие в приземной атмосфере. Обычно рассматривают отдельно влияние тропосферы и ионосферы, что связано с частотной зависимостью этого влияния.

Первые три из указанных выше механизмов взаимодействия электромагнитного излучения со средой приводят к снижению энергетического потенциала средства и, как следствие, к уменьшению дальности обнаружения, связи, управ-

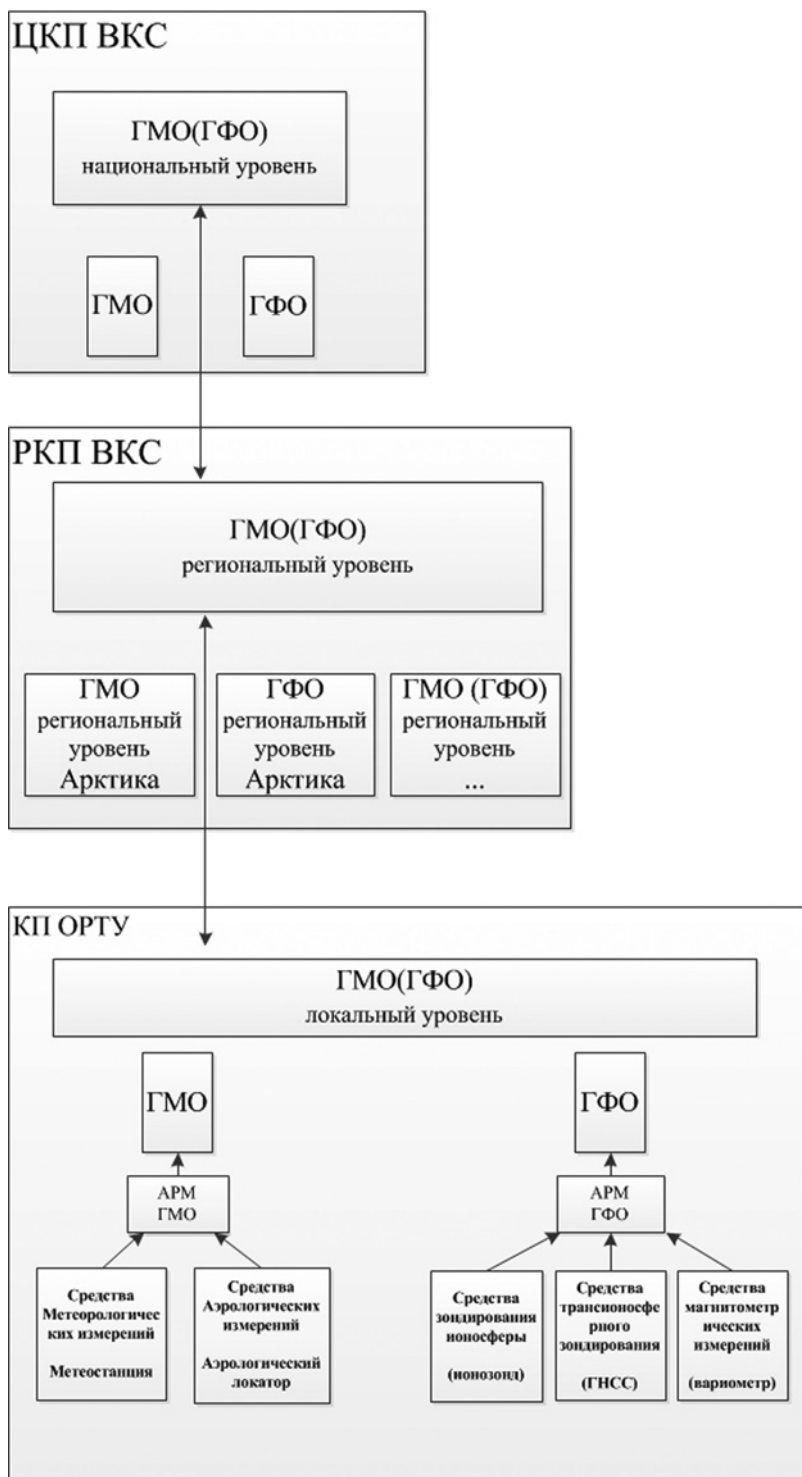


рис. 1. Структура предлагаемой системы ГМО (ГФО).

ления. Остальные два механизма взаимодействия приводят к снижению точностных характеристик средства при радиолокации, ошибкам определения координат местоположения, к перепутыванию абонентов при связи.

Учитывая, что отдельные средства являются составной частью системы, то изменения того или иного параметра средства (дальности обнаружения, точности измерения координат и т. д.) не позволяют оценить изменение качества решения задач, поставленных перед этой системой. Поэтому на практике оценку влияния какого-либо внешнего воздействия (в нашем случае среды распространения (функционирования)) на средство осуществляют через изменение качества решения задач этой вышестоящей системы.

В общем и целом, эффективность системы зависит от ее параметров и внешних условий.

Если обозначить через $X = \{x_i\}$, $i = 1, p$ – множество параметров системы, характеризующих как элементы системы, так и связи между ними, а через $Y = \{y_s\}$, $s = 1, m$ – множество параметров внешней среды, то тогда:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(X, Y).$$

Практическую ценность представляют только те системы, эффективность которых превосходит некоторый пороговый уровень \mathcal{E}^* , т. е.

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}^*.$$

Показатели качества системы зависят от условий ее функционирования. Если эти условия случайны, то случайны и показатели качества. Для количественной оценки показателей качества всей системы, необходимо прибегнуть к статистическим оценкам. В качестве таких оценок можно принять, например, зону наблюдения, полноту отображения информации, частоту сбоев в работе оборудования и др. Это позволит провести, исходя из изменения выбранных показателей, ранжирование условий функционирования по степени «опасности» как для того или иного средства системы, так и системы в целом и определить наиболее целесообразные направления взаимодействия данной системы с системой гелиогеофизического контроля ОКП.

Возросшие требования к оперативности принятия решения, необходимость обеспечения высоких точностных характеристик, соизмеримость периодов возмущения среды распространения, когда наблюдается резкое ухудшение качества решения стоящих перед информационными средствами задач, с интервалом принятия решения привели к тому, что указанная проблема – проблема учета негативного влияния среды распространения, вышла на первый план.

Дальнейшее эффективное применение предлагаемых технических решений, таких как использование сверхширокополосных сигналов, большебазовых антенных систем, современных методов оптимальной обработки, дальнейшая миниатюризация интегральных микросхем бортовой аппаратуры КА и др., ограничивается непосредственным влиянием среды функционирования.

Изучение среды (её экстремальных состояний) позволяет, с одной стороны, определять слабые (уязвимые) места разрабатываемого и эксплуатируемого сред-

ства, а, с другой стороны, определять на этой основе возможные направления развития систем на новых физических принципах. Кроме того, знание естественных экстремальных параметров среды может быть использовано для определения признакового пространства, на основе которого возможно осуществление идентификации характера (источника) происхождения этого экстремального состояния среды. Правильная оперативная идентификация естественного или искусственного характера природы происхождения экстремального состояния среды функционирования позволит своевременно принять адекватные решения на парирование этого состояния либо путем компенсации негативного влияния среды, либо путем устранения источника, формирующего это состояние.

В США работы по исследованию влияния условий в ионосфере и обеспечению надежного функционирования технологических систем уже длительное время ведутся в соответствии со стратегическим планом национальной программы по космической погоде (NSWP), принятым в 2010 году на период 10 лет. Предыдущий план был принят в 1995 году. В этом плане приведено системное видение проблемы контроля и предсказания параметров космической погоды, необходимость компенсации ее негативного влияния на человеческую деятельность и на передовые технологии, которые лежат в основе развития экономики и национальной безопасности страны. В работах в указанных направлениях в США участвуют министерство обороны, метеорологии, транспорта, внутренних ресурсов, энергетики, торговли, госдепартамент NASA, Национальный научный фонд и т. д. Подход, изложенный в NSWP, по мнению разработчиков позволяет оптимальным образом решать поставленные задачи согласованно, без дублирования и межведомственных проблем [4].

В СССР и РФ контроль состояния ионосферы проводился в рамках геофизической службы [1–3]. Было развернуто несколько десятков станций, которые передавали полтора десятка параметров ионосферы в обрабатывающий центр (ИПГ им. Е.К. Федорова Росгидромета). Статистика работы геофизической службы СССР показывает, что комплексная обработка информации с сети автоматических ионосферных станций, магнитометрических и метеорологических обсерваторий позволяла контролировать и прогнозировать не только метеорологическую и ионосферную обстановку над территорией страны и ее приграничных областей, но и вследствие большого пространственного (по долготе) разнорасположения магнитометрических станций с высокой достоверностью оценивать планетарную геомагнитную ситуацию, рассчитываемую ранее только по данным сети международных геомагнитных станций. Однако отечественная гелиогеофизическая служба, как система, создавалась в XX веке отчасти стихийно, с учетом международных научных программ типа Международного Геофизического года (МГГ) и Международного Года Спокойного Солнца (МГСС), и не соответствовала современным критериям сбора и комплексной обработки гелиогеофизической информации.

До настоящего времени большинство современных отечественных источников информации по космической погоде (ИПГ, ИКИ, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН) [4–7], демонстрирующих оценки гелиогеофизической обстановки, как правило,

используют данные наблюдений и прогнозы, получаемые с сайтов зарубежной сети. Это лишает отечественную гелиогеофизическую службу автономности и делает ее зависимой от доступа к данным, который может быть прерван в любой момент. Ряд данных доступен только для ретроспективного анализа, в то время как зарубежные исследователи имеют доступ к данным реального времени. Расчет различных планетарных геомагнитных и геофизических индексов проводится в настоящее время в основном на основании зарубежных экспериментальных данных, либо просто копируется с зарубежных сайтов.

Таким образом, отечественная ГГФС в ее нынешнем состоянии по своему составу, аппаратурной оснащенности, оперативности, ответственности за предоставляемые данные в ходе использования их в процессе текущей работы специализированных средств и систем не отвечает требованиям со стороны этих средств и систем, обеспечивающих в первую очередь национальную безопасность РФ, оперативное реагирование на естественные и техногенные процессы негативного характера. Анализ тенденций развития данной службы также не позволяет надеяться на коренное изменение сложившейся ситуации в ближайшей перспективе.

При решении данной проблемы можно выделить следующие основные вопросы:

- недостаточная изученность среды распространения (особенно в условиях возмущений);
- недостаточная эффективность практического применения существующего парка математических моделей среды распространения для решения конкретных прикладных задач;
- необходимость формирования требований к составу, объему и периодичности обновления геофизических параметров, позволяющих классифицировать условия функционирования специализированных средств и систем.
- необходимость модернизации алгоритмов оценки возможности РТС с учетом влияния среды распространения.
- необходимость реализации режима самообеспечения РТС данными о параметрах среды распространения и возможностью реализации данного режима (создания многоуровневой системы геофизического обеспечения).

Необходимость создания СГО обусловлена целым рядом причин. В настоящее время каждая информационная система различного ведомственного подчинения самостоятельно решает задачу необходимости адаптации к текущим геофизическим условиям, хотя сфера деятельности в силу специфики решаемых задач у ряда систем может быть общей и единой. Следовательно, должна быть и единая система оценки этих условий функционирования, учитывающая индивидуальные особенности каждой из указанных выше систем.

Решение проблемы геофизического информационного обеспечения лежит в плоскости интеграции всех имеющихся сегодня и разрабатываемых различного рода геофизических систем и средств различных физических принципов действия и видов базирования вне зависимости от видовой или ведомственной принадлежности.

Принципиально важно, чтобы вся информация поступала в единую базу данных о состоянии средств и систем, потребляющих гелиогеофизическую информацию, о текущих условиях их функционирования. Данная база должна вестись в реальном масштабе времени и обеспечивать возможность решения всех задач геофизического информационного обеспечения и управления системами и средствами.

Проведенный анализ показывает, что на первом этапе решения указанной задачи – создания СГО, целесообразно определить первоочередной круг задач, решаемых данной системой, определить, опираясь на имеющийся у Разработчика и Заказчика разрозненный опыт решения подобного рода задач, минимально необходимый состав периферийных датчиков данной системы, оценить их ожидаемую эффективность, структуру СГО, состав её баз данных, общего и специализированного программного обеспечения, направления информационного взаимодействия с организациями РАН по рассматриваемому направлению.

СГО РТС должна быть предназначена для решения задачи определения ионосферных и тропосферных искажений при определении дальности и угла места в алгоритмах РТС.

СГО должна решать следующие задачи:

- формирование базы данных (БД) по параметрам гидрометеорологических (геофизических) условий (ГГУ), в том числе по ионосферной и тропосферной задержкам при определении дальности и угла места в алгоритмах РТС;
- определение текущих и прогнозных ГГУ обслуживаемого СГО средства;
- корректировка параметров математических региональных моделей геофизической среды функционирования, используемых при оценке текущих и прогнозных характеристик РТС;
- оценка текущих и прогнозных характеристик влияния среды распространения на входные сигнальные характеристики РТС: пространственные (траекторные), частотные, энергетические и поляризационные (например);
- формирование текущих и прогнозных корректирующих коэффициентов для снижения негативного влияния среды распространения на выходные характеристики РТС;
- оценка степени компенсации негативного влияния геофизической среды функционирования на выходные характеристики РТС. Определение максимально достижимого уровня компенсации этого влияния;
- обеспечение требуемого качества при поддержании и наполнении различного рода информационных баз РТС;
- оценки качества функционирования РТС зарубежных стран в геофизических условиях, аналогичных для рассматриваемого отечественного средства при проведении сопоставительных оценок в ходе различных учений, тренировок и исследований.

Для всех рассматриваемых вариантов в состав СГО должны входить следующие основные элементы (рис. 2):

- источники данных;
- Центр обработки данных (ЦОД).

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

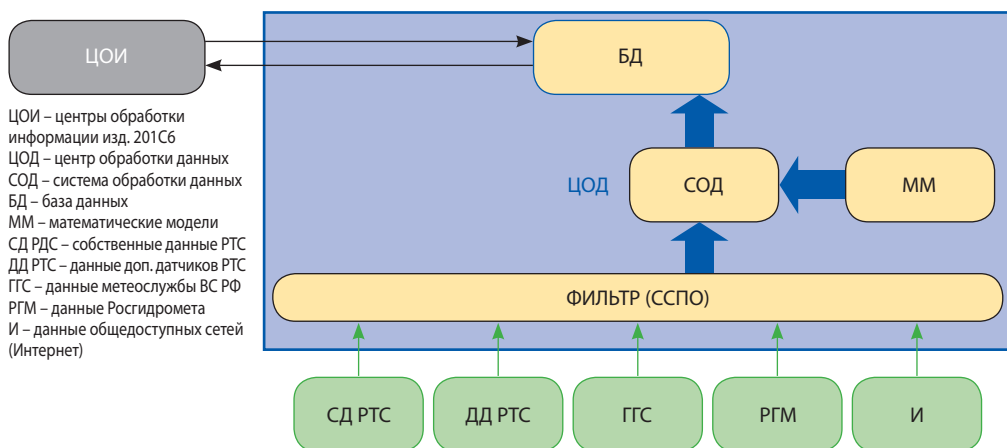


рис. 2. Функциональная схема системы геофизического обеспечения.

Источники данных должны подразделяться на следующие категории:

- собственные данные РТС (СД РТС);
- данные дополнительных датчиков информации, расположенных в зоне работы РТС (ДД РТС);
- данные Росгидромета (РГМ);
- данные Главной гидрометеорологической службы ВС РФ (ГТС);
- данные из общедоступных сетей (интернет) (ИНТ).

Источники данных имеют различные типы данных (файлы, СУБД, виртуальные и др.), технологические платформы, системы связи, различные протоколы интеграции разнородных данных. Данные всех категорий собираются автоматически в реальном режиме времени в ЦОД.

В ЦОД входят следующие основные элементы:

- система баз данных (БД) по параметрам ГГУ.
- фильтр на входе (специальное программное обеспечение (СПО), выполняющее функции ограничителя поступления данных в ЦОД по различным критериям: по территории, по типам, по времени и др.);
- система автоматизированного сбора данных в реальном режиме времени (САС);
- система виртуальных серверов;
- система обработки данных в реальном режиме времени (в том числе модели тропосферы и ионосферы) (СОД);
- система принятия решений (СПР);
- система прогноза ГГУ (СП).

СГО должна иметь несколько режимов работы (спокойные ГГУ, возмущения ГГУ, сильные возмущения ГГУ (например, сильная магнитная буря, $K_p=9$ или грозовые явления и др.).

ЦОД, кроме того, имеет несколько дополнительных вариантов работы (все источники данных исправны, один или несколько источников данных неисправен, отсутствуют все источники данных по ГГУ).

Данная классификация является в какой-то мере общепринятой при описании геофизических условий и поэтому ее использование позволяет в ряде случаев использовать уже имеющийся статистический материал по описанию прошедших и ожидаемых геофизических условий для оценки их влияния на качество работы РТС.

Для принятой классификации условий функционирования в таблице 1 приведены диапазоны изменения индексов и ионосферных параметров, характерные для выбранных уровней возмущенности.

таблица 1

уровень возмущенности	тип индекса							
	W	S	F _{10,7}	Kp	ΣKp	AE	Dst	ΔfoF2
спокойные условия	0–10	0–167	<85	0–2	0–18	<190	<160	±10 ±15
слабо возмущенные условия	11–50	183,7–835	< 120	3–4	19–31	<370	<230	±11–15 <±20
возмущенные условия	51–100	851,7–1670	< 160	5–6	32–44	<736	<320	±16–20 <±30
сильно возмущенные условия	101–150 и более	1686,7–2505	> 160	7–9	45 и более	>737	>321	> ±20 > ±30

Примечание: S измеряется в миллионных долях полусферы Солнца;

AE и Dst измеряются в гаммах;

ΔfoF2 измеряется в % от скользящей медианы (в числителе приведены полусуточные значения ΔfoF2, в знаменателе – ежечасные).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности работы радиотехнических средств во всех гелиогеофизических условиях эксплуатации необходима разработка многоуровневой системы геофизического обеспечения, которая должна иметь открытую архитектуру специализированного программного обеспечения, возможность адаптации автономного аппаратного комплекса к конкретным условиям эксплуатации РТС различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авдюшин С.И., Данилов А.Д., Данилкин Н.П., Дликман Ф.Л., Михайлов А.В., Калинин Ю.К., Фарберов В.Л. Построение, задачи и перспективы ионосферной службы. // Сб. статей «Ионосферно-магнитная служба, современное состояние, задачи и перспективы» / Под ред. С.И. Авдюшина и А.Д. Данилова. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 5-45.

- [2]. Дликман Ф.Л., Кривчикова В.П., Фришберг Ф.М., Фролов С.Г. Информационное обеспечение оперативной диагностики и прогноза состояния ионосферы. // Сб. статей «Ионосферно-магнитная служба, современное состояние, задачи и перспективы» / Под ред. С.И. Авдюшина и А.Д. Данилова. Л.: Гидрометеоздат, 1987. С. 237-243.
- [3] Аксенов О.Ю., Боев С.Ф., Виноградов А.Г., Лучин А.А., Потехин А.П. Проблемные вопросы создания системы прогноза геогелиогеофизических условий функционирования радиолокационных станций сверхдальнего обнаружения. // Труды XXIV Всероссийской Научной Конференции Распространения Радиоволн (РРВ–24), посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова. Иркутск, 2014. Т. IV. Секция 6. С. 5-8.
- [4] Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации 3 сентября (2010) № 1458-р. URL: http://www.global-climate-change.ru/downl/Strategy_rgm.pdf.
- [5] Петрукович А.А. (ред.) Солнечно-земные связи и космическая погода. // «Плазменная гелиофизика». 2008. Т. 1. Гл. 8. С. 175-257.
- [6] Аксёнов О.Ю., Аникин В.А., Борисов Ю.А., КондранинТ.В., Кузьмин А.К., Ланшин В.Б., Ляхов А.Н., Мёрзлый А.М., Потанин Ю.Н., Салтанов П.Я., Свидский П.М., Трёкин В.В. Основы развития перспективной системы контроля состояния фоновой обстановки в полярной ионосфере и ее краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли: препринт – Москва, Россия: ЦАО–МФТИ, 2015. – 40 с.
- [7] Решение заседания Межведомственной группы комплексного анализа геолого-физической обстановки в окружающем космическом пространстве Роскосмоса от 5 июня 2015 г.

SYSTEM OF GEOPHYSICAL DATA PROVISION FOR RADIO-TECHNICAL FACILITIES

А.М. Mërzlyy¹, А.Г. Vinogradov³, А.К. Kuzmin¹, О.В. Nikiforov⁶, G.M. Kruchenitsky², А.Н. Teoharov³, V.V. Trëkin⁵, S.Y. Habibulin⁴

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow, Russia

² Federal state budgetary institution «Central Aerological Observatory» of Roshydromet (FSBI «CAO» Roshydromet)

³ Joint Stock Company «Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute» (JSC RTI), Moscow, Russia

⁴ Central Design Bureau Open Joint Stock Company «RTI» (OJSC «RTI»), Moscow, Russia

⁵ NIITs Central Research Institute of VKO (NIITs CRI VKO), Moscow, Russia

⁶ Geophysical Center RAS (GC RAS), Moscow, Russia

Aspects of creation of a modern system of geophysical data provision (SGDP) for various radio-technical facilities are considered. We present proposals for SGDP formation, including a list of tasks to be solved, system composition and structure. Details of specialized software for calculating ionospheric and tropospheric parameters are provided. Possible data formats and the procedure for information exchange are also discussed.

Keywords: near-Earth space, the operation of radio equipment, geophysical support system, the effective application of technical solutions, offset the negative impact of geophysical environment.

Mërzlyy Alexei Mikhailovich – senior researcher, Department of Space Plasma Physics, IKI RAN, PhD, pinega@list.ru.

Vinogradov Alexander G. – head of division, senior scientist, JSC RTI, candidate of science in physics and mathematics, vinogradov@rti-mints.ru.

Kuzmin Aleksandr Konstantinovich – main specialist, Department of Space Plasma Physics, IKI RAN, PhD, alkuzmin@mail.ru.

Nikiforov Oleg V. – senior research fellow, Geophysical Center RAS, 1002oleg@rambler.ru.

Kruchenitsky Grigory Mikhailovich – head of «CAO» Roshydromet, doctor of physical and mathematical sciences, omd@cao-rhms.ru.

Teoharov Alexander Nartsissovich – head of subdivision, JSC RTI, candidate of science in physics and mathematics, ateokharov@rti-mints.ru.

Trëkin Vyacheslav Vladimirovich – senior researcher NIITs CRI VKO, Ph.D., news197@mail.ru

Khabibulin Sergey – senior researcher, the Central Design Bureau OJSC «RTI», Ph.D., SKhabibulin@oaorti.ru.

НАСТРОЙКА ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Т.В. Подладчикова¹, Ю.Ю. Шприц², А. Келерман²

¹ Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), г. Москва

² Отдел земных, планетарных и космических наук, Калифорнийский университет (UCLA), Лос-Анджелес, США

Предложены методы обработки точечных спутниковых измерений потоков релятивистских электронов для оценки состояния и эволюции динамики радиационных поясов Земли (РПЗ). Разработан адаптивный фильтр Калмана на основе идентификации статистических характеристик погрешностей спутниковых измерений и ошибок теоретических моделей РПЗ, который оптимизирует алгоритм оценивания динамики РПЗ. Предложена техника определения скорости радиальной диффузии и диффузии по энергии по экспериментальным данным.

Ключевые слова: радиационные пояса Земли, релятивистские электроны, радиальная диффузия, адаптивный фильтр Калмана, идентификация статистических характеристик шумов состояния и измерения, обработка данных.

ВВЕДЕНИЕ

Релятивистские электроны радиационных поясов Земли (РПЗ) представляют угрозу спутникам и человеку в космосе. Поэтому остро стоит задача обработки спутниковых измерений потоков релятивистских электронов для моделирования и прогнозирования состояния и эволюции РПЗ. Однако существующей проблемой для глобального восстановления всей магнитосферы Земли является неравномерность проведения измерений по времени и пространству. В условиях точечных спутниковых измерений, ограниченных конкретным местом и временем, многие сектора магнитосферы практически не покрыты измерениями. Дополнительные трудности связаны с погрешностью и неопределенностью спутниковых измерений, с необходимостью выявления неадекватных представлений теоретических моделей РПЗ, а также высокой размерности задачи.

В данной работе представлена разработка и настройка адаптивного фильтра Калмана для глобального восстановления динамики РПЗ по данным спутниковых измерений потоков электронов проекта Van Allen Probes с использованием трехмерного (3-D) диффузионного уравнения Фоккера-Планка. Для оптимизации алгоритма обработки выполняется идентификация неизвестных статистических характеристик ошибок теоретических моделей РПЗ и погрешностей спутниковых измерений. Полученные оценки фильтра Калмана дополнительно уточняются на основе использования процедуры сглаживания, выполняемой в обратном времени.

Татьяна Владимировна Подладчикова – с.н.с., Сколтех, t.podladchikova@skoltech.ru.

Шприц Юрий Евгеньевич – руководитель группы по моделированию радиационной среды, UCLA, yshprians@igpp.ucla.edu.

Келерман Адам – н.с., UCLA, akellerman@igpp.ucla.edu.

Показывается, что разработанный алгоритм обработки обеспечивает фильтрацию случайных флуктуаций спутниковых измерений, устранение пропусков на интервалах времени между точечными измерениями и надежное восстановление динамики РПЗ.

На основе полученных результатов восстановления динамики РПЗ определяются качественные и количественные оценки скорости радиальной диффузии и диффузии по энергии.

1. РЕШЕНИЕ 3-D УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА–ПЛАНКА

Динамика релятивистских электронов РПЗ описывается 3-D моделью, основанной на модификации уравнения Фоккера–Планка [Schulz, Lanzerotti, 1974], которое представлено в терминах адиабатических инвариантов и включает радиальную диффузию, диффузию по питч-углу и диффузию по энергии [Subbotin, Shprits, 2009]. Численное решение 3-D уравнения Фоккера–Планка X_j^{mod} на каждом шаге j определяется на основе модели 3-D Versatile Electron Radiation Belt (VERB) и метода расщепления оператора [Subbotin, Shprits, 2009; Shprits et al., 2013], когда многомерное решение S_j получено в результате последовательного разделения на три одномерных оператора, описывающих динамику радиальной диффузии, диффузии по питч-углу и диффузии по энергии. Полученное решение S_j линейно интерполируется на сетку (L^*, μ, α) , при этом диапазон значений L^* определяется от 1 до 6 и разбивается на 51 интервал, диапазон значений μ от 0,01 MeV до 10 MeV также разбивается на 51 интервал, и диапазон значений питч-углов α от $0,7^\circ$ до $89,7^\circ$ разбивается на 18 интервалов.

2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Для применения фильтра Калмана модель динамики РПЗ необходимо представить в пространстве состояний.

Уравнение состояния для каждого фиксированных значений μ и α

$$X_{j+1} = \Phi_{j+1,j} X_j + W_{j+1} \Delta t_{j+1}, j=1, \dots, N \quad (1)$$

Здесь X_j – 51-мерный вектор состояния на шаге j , компонентами которого является плотность электронов в фазовом пространстве (ПЭФП) для всех значений L^* при фиксированных значениях μ и α ; $\Phi_{j+1,j}$ – переходная матрица размерности 51×51 , которая связывает вектор состояния X_j на шаге j с вектором состояния X_{j+1} на шаге $j+1$; Δt_{j+1} – интервал времени между измерениями; W_{j+1} – некоррелированный шум состояния, описывающий ошибки теоретической модели РПЗ.

Уравнение измерений для каждого фиксированных значений μ и α

$$Z_j = H_j X_j + Y_j, \quad (2)$$

Здесь Z_j – вектор измерений на шаге j , компонентами которого являются значения ПЭФП, пересчитанные из измерений потоков электронов на основе модели TS04 [Tsyganenko, Sitnov, 2005], и интерполированные на многомерную сетку

(L^*, μ, α) ; H_j – матрица наблюдений; Y_j – некоррелированный несмещенный шум измерения, который описывает ошибки определения ПЭФП, пересчитанной из зашумленных спутниковых измерений потоков электронов. Статистические характеристики шума состояния W_i и шума измерения Y_j предполагаются неизвестными. Переходная матрица $\Phi_{j+1,j}$ определяется на основе полученных решений S_j на сетке (L^*, μ, α) при последовательном фиксировании всех значений питч-углов α и энергий E следующим образом

$$\Phi_{j+1,j} = \text{diag}\left(\frac{S_{j+1}}{S_j}\right)$$

Восстановленная переходная матрица $\Phi_{j+1,j}$ имеет диагональную форму, что позволяет предотвратить вычислительные сложности, связанные с плохой обусловленностью ковариационных матриц ошибок оценивания, а также выполнить независимую фильтрацию ПЭФП в каждом отдельном L^* при последовательном фиксировании всех значений питч-углов α и энергий E .

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ШУМОВ МОДЕЛИ

На практике, как правило, статистические характеристики шума состояния и измерения достоверно неизвестны, что может привести к расходимости фильтра Калмана и ложным выводам. Идентификация статистических характеристик шумов состояния и измерения для 1-D модели радиальной диффузии приведена в работах [Podladchikova et al., 2014a, b]. Подход к идентификации для 3-D модели основан на тех же принципах, однако алгоритм существенно упрощается в условиях независимой обработки измерений для каждого L^* на основе одномерной модели в пространстве состояний

$$\begin{aligned} x_{j+1} &= \phi_{j+1,j} x_j + w_{j+1} \Delta t_{j+1}, \\ z_j &= x_j + \varepsilon_j \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь x_j – значение ПЭФП в рассматриваемом L^* для фиксированных значений питч-угла α и энергии E на шаге j ; $\phi_{j+1,j}$ – диагональный элемент переходной матрицы $\Phi_{j+1,j}$, соответствующий данному L^* ; w_{j+1} – некоррелированный шум с неизвестными смещением q и дисперсией σ_w^2 , Δt_{j+1} – интервал времени между измерениями ПЭФП на шаге j и шаге $j+1$; ε_j – некоррелированный несмещенный шум измерений с неизвестной дисперсией σ_ε^2 .

Оценки неизвестных статистических характеристик q и σ_w^2 шума состояния модели (3) определяются следующим образом

$$\hat{q} = \sum_{j=2}^N v_j / \sum_{j=2}^N \Delta t_j; \quad \hat{\sigma}_w^2 = \sum_{j=2}^N (v_j - \hat{q}) / \sum_{j=2}^N (\Delta t_j)^2;$$

где $v_j = z_j - \phi_{j,j-1} z_{j-1}$.

Рис. 1 показывает результаты идентификации статистических характеристик шумов модели для L^* от 1 до 6 по данным точечных измерений прибора REPT проекта Van Allen Probes при фиксированных значениях адиабатической инварианты $\mu = 2129$ MeV/G и питч-угла $\alpha = 43^\circ$ для 3-D диффузионной модели (крас-

ная кривая). Для сравнения на рисунке показаны результаты идентификации для 1-D модели радиальной диффузии (синяя кривая), представленные в работе [Podladchikova et al., 2014a]. Как видно из рис. 1а, смещение q шума состояния для одномерной модели (синяя кривая) возрастает с ростом L^* , в то время как переход к 3-D модели позволяет устранить это смещение (красная кривая). Рис. 1б показывает, что стандартное отклонение σ_w шума состояния возрастает с ростом L^* для одномерной модели (синяя кривая) до величин, превышающих в 3–4 раза стандартное отклонение для 3-D модели (красная кривая). Это является аргументом в пользу более высокой степени адекватности 3-D модели, так как смещение q и стандартное отклонение σ_w шума состояния характеризуют уровень адекватности модели. Чем меньше значения q и σ_w , тем выше доверие к модели.

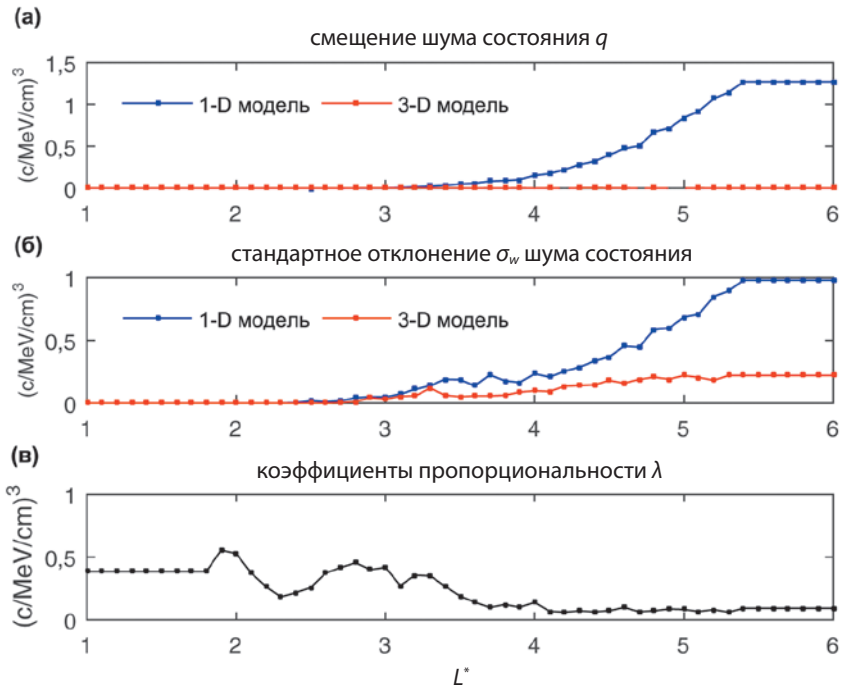


рис. 1. Результаты идентификации статистических характеристик шумов состояния и измерения для L^* от 1 до 6 по данным измерений прибора REPT проекта Van Allen Probes при фиксированных значениях адиабатической инварианты $\mu = 2129$ MeV/G и питч-угла $\alpha=43^\circ$ для 3-D модели (красная кривая) и 1-D модели (синяя кривая).

(а) Смещение q шума состояния w на один шаг (10 мин.).

(б) стандартное отклонение σ_w шума состояния w на один шаг.

(в) Коэффициенты пропорциональности λ для стандартных отклонений σ_ϵ шума спутниковых измерений ϵ .

Идентификация стандартного отклонения σ_ϵ шума измерений ϵ модели (3) выполнялась в предположении о том, что σ_ϵ пропорционально измерениям ПЭФП, т.е. $\sigma_\epsilon = \lambda z_j$, где λ – неизвестный коэффициент пропорциональности. Оценки коэффициентов пропорциональности определяются следующим образом

$$\lambda = \sqrt{\sum_{j=2}^N (v_j - \hat{q})^2 / \left(\sum_{j=2}^N (z_j)^2 + \phi_{jj-1}^2 z_{j-1}^2 \right)}$$

и приведены на рис. 1в. Как видно из рисунка, с ростом L^* , коэффициенты λ уменьшаются, т.е. относительная ошибка измерений уменьшается с ростом L^* . Полученные оценки статистических характеристик шумов состояния и измерения q , σ_w и σ_ε были использованы для построения алгоритма калмановской фильтрации спутниковых измерений.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе приведены результаты совместной обработки измерений спутников Van Allen Probes A и B на основе фильтра Калмана и дополнительного сглаживания оценок фильтра Калмана. Алгоритмы калмановской фильтрации и сглаживания приведены в работах [Podladchikova et al., 2014a, b]. Измерения ПЭФП прибора REPT при фиксированных значениях $\mu = 2129$ MeV/G и питч-угла $\alpha=43^\circ$ приведены на рис. 2а. Рис. 2б показывает измерения ПЭФП прибора MAGEIS при фиксированных значениях $\mu = 159$ MeV/G и питч-угла $\alpha=43^\circ$. Предложенный метод обработки спутниковых измерений обеспечивает фильтрацию случайных флуктуаций измерений и устранение пропусков на интервалах времени между точечными измерениями. Рис. 2в и рис. 2г демонстрируют результаты оценивания динамики ПЭФП во всей магнитосфере в пределах L^* от 1 до 6 по данным измерений приборов REPT и MAGEIS.

5. ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАДИАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ

Для оценки скорости радиальной диффузии и направления ее распространения по результатам обработки спутниковых измерений анализировалась динамика моментов регистрации пиков ПЭФП в соседних L^* . Для точного выделения пиков ПЭФП требуется дополнительно уточнить полученные оценки ПЭФП с помощью метода экспоненциального сглаживания [Brown, 1963] для всех значений L^* .

Экспоненциальное сглаживание оценок ПЭФП

$$X_{j+1}^f = X_j^f + \beta(\hat{X}_{j+1} - X_j^f), \quad (4)$$

где \hat{X}_{j+1} – оценка вектора состояния ПЭФП, $\beta=0,001$ – коэффициент сглаживания. Кроме того, для устранения смещения оценок X_{j+1}^f выполняется их сглаживание в обратном времени

Обратное экспоненциальное сглаживание X_{j+1}^b

$$X_k^b = X_{k+1}^b + \beta(X_{k+1}^f - X_{k+1}^b) \quad (5)$$

Рис. 3 показывает зависимость момента регистрации времени достижения пика ПЭФП от L^* на интервале от 3,7 до 5,4 для фиксированного значения питч-угла $\alpha=43^\circ$ при различных значениях μ . Самый ранний пик ПЭФП регистрируется на $L^*=4,2$. Пик ПЭФП сдвигается быстрее в сторону более высоких L^* ,

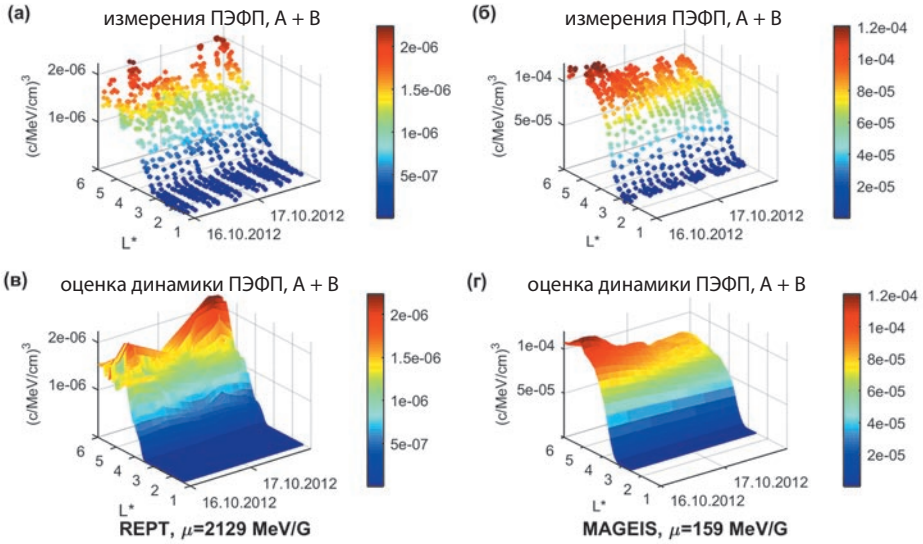


рис. 2. Оценки динамики ПЭФП во всей магнитосфере в пределах L^* от 1 до 6 на основе фильтра Калмана и сглаживания, с использованием измерений обоих спутников Van Allen Probe A и B. (а) Измерения ПЭФП прибора REPT при фиксированных значениях $\mu = 2129$ MeV/G и питч-угла $\alpha=43^\circ$. (б) Измерения ПЭФП прибора MAGEIS при фиксированных значениях $\mu = 159$ MeV/G и питч-угла $\alpha=43^\circ$. (в) Оценки динамики ПЭФП на основе измерений прибора REPT. (г) Оценки динамики ПЭФП на основе измерений прибора MAGEIS.

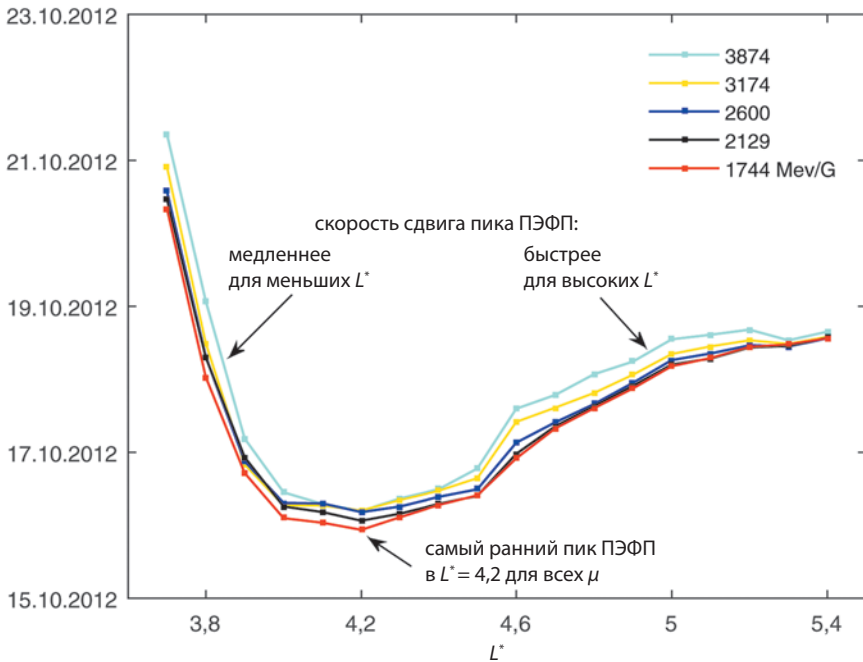


рис. 3. Зависимость момента регистрации времени достижения пика ПЭФП от L^* на интервале от 3,7 до 5,4 для фиксированного значения питч-угла $\alpha=43^\circ$ при различных значениях μ .

чем в сторону более низких L^* для всех значений μ , демонстрируя направление радиальной диффузии. Количественные оценки скорости радиальной диффузии определяются скоростью сдвига пика ПЭФП относительно L^* . Из рисунка видно, что пик ПЭФП регистрируется раньше для меньших значений μ , что является подтверждением источника диффузии по энергии. Например, в пике ПЭФП на $L^*=4,2$ энергия электронов 3,5 MeV ($\mu = 1744$ MeV/G) выросла до величины 5,5 MeV ($\mu = 3874$ MeV/G). Интервал времени между регистрацией этих пиков составляет 6 часов и 10 минут, что позволяет получить оценку скорости 0,32 MeV/час.

Данные зависимости получены в результате последовательных статистических процедур и могут содержать статистические ошибки. Однако синхронная динамика полученных кривых в условиях независимой обработки измерений для каждого L^* является аргументом в пользу того, что полученные результаты отражают истинную динамику PSD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод обработки спутниковых измерений на основе адаптивного фильтра Калмана устраняет пропуски на интервалах времени между точечными измерениями и обеспечивает глобальное восстановление динамики РПЗ во всей магнитосфере в пределах L^* от 1 до 6. Предложен подход к оценке скорости радиальной диффузии и диффузии по энергии по данным спутниковых измерений. Показано, в частности, что радиальная диффузия начинается на $L^*=4,2$ и распространяется быстрее в сторону более высоких L^* , чем в сторону более низких L^* . Показано, что пик ПЭФП регистрируется раньше для меньших μ , что свидетельствует об источнике диффузии по энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [Brown, 1963] *Brown R.G.* Smoothing forecasting and prediction of discrete time series // Prentice-Hall, N.Y. 1963. P. 468.
- [Podladchikova et al., 2014a] *Podladchikova T., Shprits Y., Kondrashov D., Kellerman A.C.* Noise statistics identification for Kalman filtering of the electron radiation belt observations I: Model errors // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 5700-5724.
- [Podladchikova et al., 2014b] *Podladchikova T., Shprits Y., Kondrashov D., Kellerman A.C.* Noise statistics identification for Kalman filtering of the electron radiation belt observations II: Filtration and smoothing // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 5725-5743.
- [Schulz, Lanzerotti, 1974] *Schulz M., Lanzerotti L.* Particle Diffusion in the Radiation Belts // Springer, N.Y. 1974. P. 215.
- [Subbotin, Shprits, 2009] *Subbotin D.A., Shprits Y.Y.* Three-dimensional modeling of the radiation belts using the Versatile Electron Radiation Belt (VERB) code // *Space Weather*. 2009. V. 7. P. S10001.

- [Shprits et al., 2013] *Shprits Y., Kellerman A., Kondarashov D., Subbotin D.* Application of a new data operator-splitting data assimilation technique to the 3-D verb diffusion code and CRRES measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2013, V. 40. P. 4998-5002.
- [Tsyganenko, Sitnov, 2005] *Tsyganenko N.A., Sitnov M.L.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, P. A03208.

CUSTOMIZATIONS OF KALMAN FILTER TO RECONSTRUCT THE DYNAMICS OF THE RADIATION BELTS USING SATELLITE MEASUREMENTS

T. Podladchikova¹, Y. Shprits², A. Kellerman²

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia

² Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California (UCLA), Los Angeles, USA

The methods of data assimilation of sparse satellite measurements of relativistic electron fluxes to estimate the state and evolution of Earth's radiation belts (ERB) are proposed. The adaptive Kalman filter based on the identification of statistical characteristics of satellite measurement errors and errors of theoretical models of ERB that optimizes estimation algorithm of ERB dynamics is developed. A technique to determine the rate of radial and energy diffusion on the basis of experimental data is proposed.

Keywords: Earth's radiation belts, relativistic electrons, radial diffusion, adaptive Kalman filter, noise statistics identification, data assimilation.

Podladchikova Tatiana – senior research scientist, Skoltech, t.podladchikova@skoltech.ru.

Shprits Yuri – leader of space environment modeling group, UCLA, yshprits@igpp.ucla.edu.

Kellerman Adam – assistant researcher, UCLA, akellerman@igpp.ucla.edu.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАВАЕМОГО ОРБИТАЛЬНОГО ИМАДЖЕРА АВРОВИЗОР-ВИС/МП И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ И ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НЕОДНОРОДНОСТИ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ

**А.К. Кузьмин¹, М.А. Баньщикова², Ю.С. Доброленский¹, Г.М. Крученицкий³, И.А. Маслов¹,
А.М. Мёрзлый¹, П.П. Моисеев⁴, Ю.Н. Потанин³, И.Н. Чувашов²**

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва

² Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета (НИИ ПММ ТГУ), г. Томск

³ Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Центральная

аэрологическая обсерватория» (ФГБУ «ЦАО» Росгидромета), г. Долгопрудный

⁴ Научно-производственное предприятие «Астрон Электроника»

(НПП «Астрон Электроника»), г. Орел

Представляются характеристики разрабатываемого аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП для гелиогеофизического комплекса аппаратуры на перспективном КА Метеор-МП, и их сопоставление с зарубежными аналогами. Обсуждаются критерии выбора разноракурсной фотометрической модели съемки авроральных структур. Представляется блок-схема ПО Вектор-М, создаваемого специально для расчетов сопутствующей информации при наблюдениях авроральных эмиссий с орбиты. На примерах зарубежных результатов одновременных наземных фотометрических наблюдений и работы GPS приемников рассматривается корреляция конкретных авроральных эмиссий со сцинтилляциями сигналов в полярных областях.

Ключевые слова: полярная ионосфера, авроральный имаджер, эмиссии полярных сияний, распространение сигналов, сцинтилляции.

Список сокращений

ВУФ – вакуумный ультрафиолет

ГГАК – гелиогеофизический аппаратный комплекс

ДЭП – дополнительный эскизный проект

Кузьмин Александр Константинович – глав. спец., ИКИ РАН, к.ф.-м.н., alkuzmin@mail.ru.

Баньщикова Мария Александровна – с.н.с., НИИ ПММ ТГУ, к.ф.-м.н., mba-tomsk@mail.ru.

Доброленский Юрий Сергеевич – с.н.с., ИКИ РАН, к.ф.-м.н., dobrolenskiy@iki.rssi.ru.

Крученицкий Григорий Михайлович – зав. отделом, «ЦАО» Росгидромета, д.ф.-м.н., профессор, omd@cao-rhms.ru.

Маслов Игорь Алексеевич – зав. сектором, ИКИ РАН, imaslov@iki.rssi.ru.

Мёрзлый Алексей Михайлович – с.н.с., ИКИ РАН, к.т.н., pinega@list.ru.

Моисеев Павел Петрович – директор, НПП «Астрон Электроника», astronel-moiseev.pp@yandex.ru.

Потанин Юрий Николаевич – с.н.с., «ЦАО» Росгидромета, к.ф.-м.н., oom@cao-rhms.ru.

Чувашов Иван Николаевич – м.н.с., НИИ ПММ ТГУ, chuvashovin@gmail.com.

КА – космический аппарат
 м.с.л. – магнитная силовая линия
 ПО – программное обеспечение
 РКС – Российские Космические Системы (корпорация)
 CGLAT – Corrected Geomagnetic Latitude
 DMSP – Defense Meteorological Satellite Program
 E–POP – Enhanced Polar Outflow Probe
 FAI – Fast Auroral Imager
 GNSS – Global Navigation Satellite Systems
 GPS – Global Positioning System
 IPP – Ionospheric Pierce Point (точка протыкания ионосферы)
 MAC – Multispectral Auroral Camera
 MAIN – Multiscale Aurora Imaging Network
 MLT – Magnetic Local Time
 OLS – Operational Linescan System
 PMAF – Poleward Moving Auroral Forms
 PRN – Pseudo Random Number code (идентификатор конкретного спутника GPS)
 REIMEI (INDEX) – small Japan satellite
 SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
 SMART – Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique
 SP – South Pole
 SSJ/5 – Special Sensor Electron/Ion Spectrometer
 SSUSI – Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager
 TEC – Total Electron Content

ВВЕДЕНИЕ

Роль дистанционной оптической диагностики в процессе контроля мгновенного состояния полярной ионосферы становится все более важной в связи увеличением пространственного и временного разрешения современных изображающих приборов и их пороговой чувствительности. Стимулами данной работы послужили необходимость контроля характеристик полярной ионосферы, влияющих на качество сигналов бортовых и наземных радиосистем в возмущенной ионосфере, интерес к исследованиям механизмов возникновения или отсутствия сцинтилляций, принимаемых на Земле сигналов от бортовых навигационных систем, проходящих сквозь авроральные структуры, а также отсутствие опубликованных данных о координированных измерениях сцинтилляций сигналов навигационных систем с измерениями интенсивности авроральных эмиссий с орбит КА REIMEI (2005–2006) (авроральный мультиспектральный имаджер MAC) и КА e-POP, запущенного в 2014 г. (авроральный двухканальный имаджер FAI) [Cogger et al., 2014; Obuchi et al., 2008], которые на данный момент являются единственными зарубежными аналогами (по ряду характеристик) создаваемой изображающей аппаратуры Авровизор-ВИС/МП (см. таблицу 1).

Таблица 1. Адаптирована из [ДЭП, 2015]. Сравнительная таблица характеристик зарубежных орбитальных авроральных имаджеров в видимой области спектра: FAI на КА e-POP (Канада) и MAS на КА REIMEI (INDEX) (Япония) с характеристиками российского аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА Метеор-МП

характеристики	Авровизор-ВИС/МП	FAI (Канада, запуск 29.09.2013)	MAS (Япония, запуск 23.08.2005)
угол поля зрения (град)	30	26	7,6
угол раствора бленды (град)	31,5	27,5	?
направление оси поля зр.	надир	надир	надир и лимб (поворотом КА)
рабочий участок орбиты	тень	тень	тень
число оптич. каналов	3	2	3
фокусное расст. (мм)	24 (все каналы)	68,9	50 (все каналы)
монохроматизация в каналах	630 нм ($\delta\lambda \sim 2$ нм, Tline $\sim 80\%$) 427,8 нм 486,1 нм Interf. filters – KeoScientific Interf. filters – Andover Corp.	630 нм ($\delta\lambda \sim 2$ нм, Tline $\sim 0,67$) 650–1100 нм, T $\sim 0,9$ Interf. filters – KeoScientific (630 нм) Schott RG645 (650–1100 нм)	427,8 нм ($\delta\lambda \sim 2,5$ нм, Tmax $\sim 46\%$) 557,7 нм ($\delta\lambda \sim 1,57$ нм, Tmax $\sim 55\%$) 670 нм ($\delta\lambda \sim 38,23$ нм, Tmax $\sim 90\%$) Interf. filters – Andover Corp.
CCD	e2V47-20 AIMO (13×13 μm) 1024×1024	e2V67 AIMO (26×26 μm) 512×512	Sony Front illuminated (6,4×6,4 μm) interline transfer 1024×1024
Qe CCD	0,8 (630 нм)	$\sim 0,8$ (630 нм); 0,66 (650–1100 нм)	$\sim 0,6$ (557,7 нм)
охлаждение матрицы (°C)	до (-20°) Пельтье	до (-25°) Пельтье	0 (радиатор)
бинирование пикс.	2×4 (630 нм и 427,8 нм) 8×16 (186,1 нм)	4×4 (630 нм) 2×2 (650–1100 нм)	16×16 (427,8 нм) 8×8 (670 нм)
время эксп. (сек)	0,1–0,8 (630 нм) 0,1–0,8 (427,8 нм) 0,8–1,6 (486,1 нм)	0,5 (630 нм) 0,1 (650–1100 нм)	0,12 (мода 0, надир), 1 (мода 1, лимб)
макс. возм. скважн. съемки	3 (в сек)	1 (630 нм); 5 (650–1100 нм)	от 0,12 до 3 (557 и 427,8 нм)
штат. связность съемки	1 (в 3 сек)	1 (в 1 сек 650–1100 нм)	1,1 (в 1 сек)
число градаций по интенсивн.	14/16 бит	16 бит	14 (linear)/10 (logarithmic)
порог чувств. (Рэлей)	~ 50 (630 нм)	200 (630 нм) 100 (650–1100 нм)	$8,14 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (427,8) $5,88 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (557,7) $5,63 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (670)
чувствит. (DN/R·sec)	$\sim 0,25$ (630 нм)	0,127 (630 нм) 0,0965 (650–1100 нм)	?
динамич. диапазон	$\sim 10^4$ (630,0) $\sim 10^4$ (427,8) $\sim 10^4$ (486,1)	? ?	$0 \div 3,21 \cdot 10^3$ (427,8) $0 \div 2,19 \cdot 10^3$ (557,7) $0 \div 2,1 \cdot 10^3$ (670)
пространств. разр. max (км)	0,4×0,4 (max при 1024×1024)	0,4×0,4 (перигей); 2,5×2,5 (апогей)	1,2×1,2 (надир); 2,4×2,4 (лимб)
пространств. разр. (км)	1,6×1,6 (630 и 427,8 нм) 9×9 (486,1 нм)	0,4×0,4 (перигей); 2,5×2,5 (апогей)	?
масса прибора (кг)	15	6,72	4,59
мощность потр. (Вт)	29 (макс. с охлажд.)	14 (10)	20,4 (радиатор)
орбита апогей-перигей (км)	820,7 (круг)	1500×325	670×610
наклонение (град)	98,68 (солн.-синхр.)	81 (не солн.-синхр.)	98,6 (солн.-синхр.)
период (мин)	101,3	103	98,8

1 КОРРЕЛЯЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ СИГНАЛОВ ОРБИТАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С АВРОРАЛЬНЫМИ ЭМИССИЯМИ И ВЫСЫПАНИЯМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

С самого начала развития орбитальных навигационных систем стало очевидным паразитное влияние ионосферных сцинтилляций на их работу [Kent, 1959], проявляющееся в ошибках определения позиции, скорости, задержках (замираниях) сигналов, а иногда даже в сбоях синхронизации и полной потери сигнала. Это влияние проявляется во всех широтах, но особенно существенно в области

Эплтоновской ионосферной аномалии и в полярных зонах. Ряд обзоров, монография [Hunsucker, and Hargreaves, 2003] и др. работы были посвящены характеристикам полярной ионосферы и ее влиянию на распространение сигналов в различных широтах. Краткий обзор теории сцинтилляций в возмущенной ионосфере представлен в [Kintner et al., 2007].

В течение 2010–2015 гг. в Канаде и США, в Скандинавских странах, в Арктике и Антарктике проводились плановые координированные наблюдения (мониторинг) и статистический анализ характеристик ионосферных сцинтилляций (мерцаний) сигналов, принимаемых наземными приемниками сети GNSS от спутников GPS (L1/L2/L2C/L5), Glonass (L1/L2), Galileo (E1/E5a/E5b/Alt-BOC) [Oksavik et al., 2015], одновременно с наземными измерениями авроральных эмиссий. В отдельных случаях наблюдения сопровождались одновременными магнитометрическими измерениями, риометрическими измерениями поглощения космического радишума, а также измерениями с орбит спутников серии DMSP (энергетических распределений заряженных частиц анализаторами SSJ/5, и относительно крупномасштабными (10×10 км) измерениями интенсивности авроральных ВУФ-эмиссий подметающим изображающим спектрометром SSUSI [Paxton et al., 1992]). Наблюдения проводились: в субавроральной зоне, авроральном овале, каспе и полярной шапке как порознь в северной и южной полусферах, так и одновременно в обеих полусферах (см. например [Prikryl et al., 2013]) в различных возмущенных условиях и в частности в условиях суббурь при значениях планетарного трехчасового индекса отклонений магнитного поля Kp от 1 до 5+ и индекса полярной электроструи $AE > 200$ нТ). Параллельно с экспериментами развивались модели распространения волн сквозь ионосферные неоднородности [Conker et al., 2003; Beniguel et al., 2009; Блаунштейн и др., 2013; Klobuchar, 1987], но из-за сложности процессов и многообразия эффектов самые современные модели пока не позволяют формировать даже краткосрочный прогноз уровня сцинтилляций сигналов в конкретных точках пространства полярной ионосферы.

В разных работах отмечают характеристики сцинтилляций и особенности результатов координированных наблюдений, в основном они сводятся к следующему:

1.1. Физические причины сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере

Причиной сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере является нарушения целостности фронта волны конкретной частоты при пересечениях неоднородностей электронной концентрации δN_e , имеющих масштабы \sim несколько сотен метров, сравнимые с первым Френелевским радиусом $r_F = \sqrt{2\lambda r}$, где λ – длина волны падающего сигнала, а r – расстояние от ионосферной неоднородности до приемника [Rino, 1979; Kintner et al., 2007; Hosokawa et al., 2014]. Эти неоднородности на пути распространения в ионосфере могут быть вытянуты (в диапазоне высот ~ 100 – 300 км) вдоль магнитных силовых линий, их образование стимулируется столкновениями нейтральных и ионизованных компонент верх-

ней атмосферы и ионосферы с высыпающимися заряженными частицами, ускоренными в ближней магнитосфере до энергий от десятков эВ до десятков кэВ, сопутствующим образованием мелкомасштабных продольных токов, локальных градиентов электронной концентрации и поперечных проводимостей в областях авроральных структур и их ближайших окрестностей, и их взаимодействием с волнами. Например, на КА e-POP была зафиксирована тонкая структура продольных токов с масштабом ~ 1 км в диффузных пятнах полярной шапки [Fritz et al., 2015; Lui et al., 2015]. Значительные электрические поля и дрейфы плазмы в авроральной ионосфере во время суббури инициируют процессы образования плазменных неустойчивостей, которые приводят к генерации неоднородных плазменных структур, в диапазоне масштабов от метров до десятков км в разных слоях на разных высотах полярной ионосферы [Basu et al., 2002; Tsunoda, 1988; Coker et al., 2004; Rino, 1979]. Как следствие, дисперсия в коэффициенте преломления среды, зависящем от: N_e , частоты волны, эффективной частоты столкновений электронов с атомами и ионами [Колосов и др., 1969], изгибание фронта и отклонение от прямолинейного распространения и интерференция поперек волнового фронта приводят к флуктуациям амплитуды и фазы сигналов (см. рис. 6). Скорости дрейфа (от нескольких сотен до км/сек) крупномасштабных авроральных структур как в экваториальном направлении, так и в полярном (PMAF) особенно в области полярного каспа, в условиях, когда модули компонент межпланетного поля связаны неравенством $|B_y| > |B_z|$ [Oksavik et al., 2015], наблюдаемых на различных стадиях суббури, существенно влияют на мгновенные распределения неоднородностей в ионосфере, усложняют диагностику процессов, приводящих к сцинтилляциям навигационных сигналов.

1.2. Обзор характеристик сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере

В серии работ [Oksavik et al., 2015; Prikryl et al., 2013; Hosokawa et al., 2014; Jiao et al., 2013; Kinrade et al., 2013; Garner et al., 2011; Scone et al., 2008; Li et al., 2010; Nomam et al., 2013; Meerin et al., 2015; Knight, 2000; Datta-Barua et al., 2003] отражены характеристики сцинтилляций сигналов навигационных систем GPS, GLONASS, Galileo. Статистика наблюдений показывает:

- а) сцинтилляции трансionoсферных радиосигналов преимущественно наблюдаются на частотах от 20 МГц до 10 ГГц; причем более сильные и долгоживущие сцинтилляции чаще наблюдаются на частотах L2C и L5, чем на L1C/A [Jiao and Morton, 2015];
- б) неоднородности с масштабами < 1 км вызывают, как правило, и амплитудные и фазовые сцинтилляции, а > 1 км – только фазовые;
- в) во время суббури в высоких широтах доминирует фазовая сцинтилляция (~ 80 % событий), ~ 11 % – амплитудные сцинтилляции, а в 9 % событий наблюдались и те и другие (во время мощных геомагнитных бурь), причем более слабые сцинтилляции наблюдаются на фазах расширения и восстановления суббури, а интенсивные – во время максимальной стадии (брейккап);

- г) среднее время длительности фазовой сцинтилляции примерно в три раза выше длительности амплитудной;
- д) сцинтилляции в области аврорального овала происходят, как правило, в ночное время (MLT), а в области полярной шапки могут наблюдаться и в дневные часы, сцинтилляции более интенсивны вблизи магнитного зенита; фазовые сцинтилляции в авроральных пятнах и дугах в полярной шапке чаще ассоциируются с крупномасштабными неоднородностями и градиентами полного электронного содержания ТЕС [Meerin et al., 2015; Basu et al., 1998; Spogli et al., 2011];
- е) сцинтилляции пространственно коррелируют с крутизной градиентов и амплитудой изменений локального геомагнитного поля;
- ж) результаты наземных спектрофотометрических координированных измерений свидетельствуют, что в авроральном овале корреляция сцинтилляций с интенсивностью низковысотной кислородной эмиссии $\lambda 557,7$ нм (E-слой) значительно выше [Kinrade et al., 2013], чем корреляция с интенсивностью эмиссии $\lambda 630,0$ нм, а в пятнах полярной шапки наоборот – выше корреляция сцинтилляций с красной кислородной эмиссией $\lambda 630,0$ нм [Oksavik et al., 2013];
- з) сцинтилляции пространственно коррелируют в сопряженных полусферах со структурами полярных сияний (конкретные дуги), являющимися прямыми индикаторами распределений высыпаний энергичных электронов в пределах времени жизни возбужденных уровней конкретных эмиссий, причем в одних и тех же событиях они могут наблюдаться (при пересечении сигналом одних и тех же структур) на одном приемнике и не наблюдаться на другом [Garner et al., 2011], либо наблюдаться при пересечении одной дуги или двух соседних дуг и не наблюдаться при пересечении следующих дуг (по пути луча) в одном и том же событии;
- и) временная эволюция сцинтилляций в течение суббурь все еще не ясна из-за недостаточности статистики образования неоднородностей N_e на разных высотах ионосферы, вызванных высокодинамичными мелко-масштабными высыпаниями электронов [Hosokawa et al., 2014];
- к) в высоких широтах геометрический фактор G [Rino, 1979] наблюдений приемниками сигналов не имеет существенного влияния на индекс сцинтилляций для орбит спутников подобных GPS [Forte and Radicella, 2004].

Для иллюстрации корреляций фазовых сцинтилляций сигналов GPS с эмиссиями в авроральных структурах приведем рис. 1, адаптированный из Fig. 2, 3 в [Kinrade et al., 2013]. На этом рисунке представлены две колонки из 4-х последовательных (с интервалом ~6–10 минут) all-sky (ASI) изображений в эмиссии $\lambda 557,7$ нм (левая колонка) и 4-х последовательных изображений в эмиссии $\lambda 630,0$ нм (правая колонка), скорректированных на дисторсию и эффект Ван-Райна, полученные 9 августа 2009 г. на станции SP (Южный полюс) во время наблюдения дискретных авроральных дуг, расположенных в секторе 16–19 MLT на геомагнитных широтах (CGLAT) 73–74°. Наблюдения проводились в условиях $K_p=3$. Реальное пространственное разрешение этих изображений после

обработки составило $\sim 7,8 \times 7,8$ км/бинированный пиксел. В этом же интервале времени приемник на станции SP (Южный Полюс) регистрировал сигналы на частотах L1 и L2 от 8–11 спутников GPS, фазовая скинтиляция (с частотой 50 Гц) которых выводилась в виде индекса σ_ϕ (усредненного по 60-ти секунднему интервалу) соответственно. Точки протыкания сигналами (от 8 спутников GPS) слоев свечения на высотах эмиссий отмечены на изображениях в виде кружочков белого цвета разной площади, соответствующей величине индекса скинтиляции фазы.

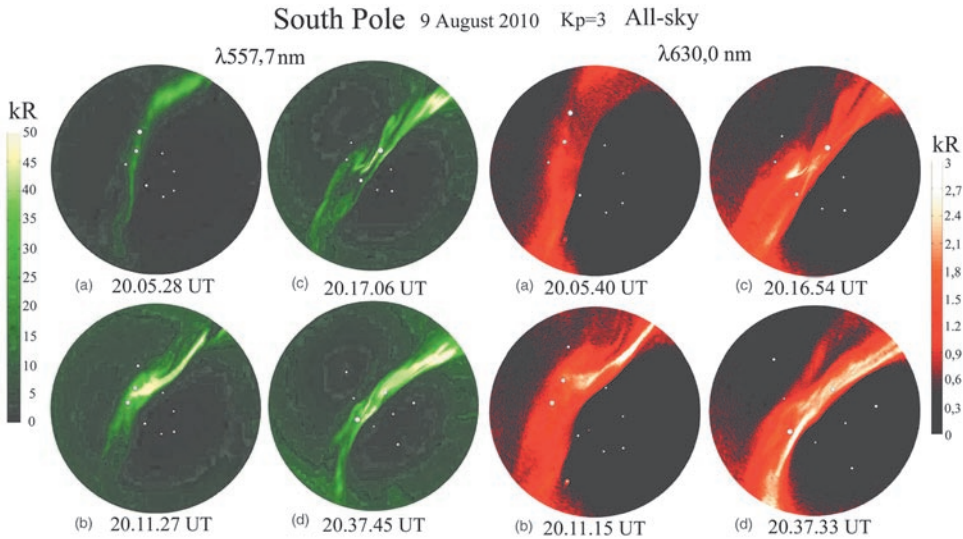


рис. 1. Адаптирован из Fig. 2 и 3 [Kinrade et al., 2013]. Корреляция локаций фазовых скинтиляций сигналов конкретных спутников GPS с авроральными all-sky изображениями интенсивности эмиссий $\lambda 557,7$ нм (левая колонка) и $\lambda 630,0$ нм (правая колонка) показана белыми точками разных диаметров на изображениях. Диаметр точек условно показывает величину индекса фазовых скинтиляций сигнала. Последовательности изображений получены в интервале 20.05.28–20.37.33 UT 9 августа 2010 г. на станции Южный Полюс.

На рис. 2, адаптированном из Fig. 4, 5 [Kinrade et al., 2013], показана временная эволюция усредненной интенсивности эмиссий $\lambda 557,7$ и $\lambda 630,0$ нм (верхняя и нижняя панели соответственно) и временная эволюция индекса фазовых скинтиляций (средняя панель) за полные сутки 9 августа 2010 г., причем интервал наблюдений, показанных на рис. 1, отмечен маленьким серым прямоугольником над верхней панелью. На рис. 4, адаптированном из Fig. 6 [Kinrade et al., 2013], показаны усредненные интенсивности эмиссии $\lambda 557,7$ нм (верхняя панель) и изменения индекса фазовой скинтиляции, усредненные по 60-ти секундным интервалам, для конкретных спутников PRN GPS в интервале 19–22 UT 9 августа 2010 г. [Kinrade et al., 2013], при этом маленькими серыми прямоугольниками также выделены интервалы наблюдений, показанных на рис. 1 all-sky изображений. Корреляция скинтиляций с эмиссиями в авроральных структурах в рассмотренном примере (рис. 1, 2, 3) очевидна в рамках масштабов измерений.

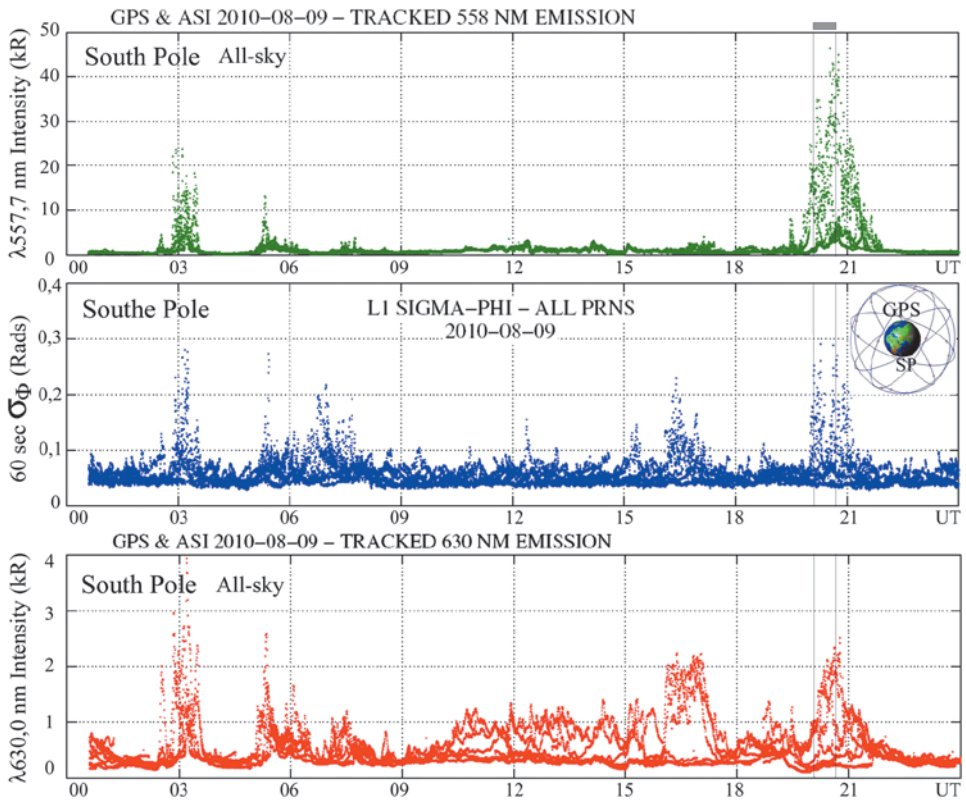


рис. 2. Адаптирован из Fig. 5 и 6 [Kinrade et al.,2013]). Суточная (9 августа 2010 г.) развертка корреляций фазовых сцинтилляций GPS сигналов с авроральными эмиссиями на станции Южный Полюс.

В работе [Prikryl et al., 2013] на Fig. 3, 4, 5 (в данной работе не показаны) рассмотрены примеры данных коррелированных наземных оптических наблюдений и фазовых сцинтилляций в южной полусфере и одновременных наблюдений энергетических характеристик высыпающих заряженных частиц со спутника DMSP F16 в сопряженной области северной полусферы во время суббури ($K_p=5+$) 29 и 30 апреля 2011 г. All-sky изображения интенсивности эмиссии $\lambda 557,7$ нм, полученные на SP (Fig.4) в трех вытянутых дугах с насыщенной многолучевой структурой с поперечными масштабами от 5 до 40 км (в координатах CGLAT–MLT) и магнитно-сопряженные распределения потоков высыпающихся электронов с энергиями >4 кэВ (Fig. 5) указывают на присутствие мелкомасштабных авроральных дуг в интервале времени 21.43–21.47 UT. При пересечении этих дуг сигналами конкретных спутников GPS (PRN 1–32) наблюдались фазовые сцинтилляции, временная развертка индекса этих сцинтилляций σ_ϕ приведена на Fig. 3, при этом цвет точек соответствует сцинтилляции сигнала от спутника GPS, имеющего конкретный идентификатор PRN. Цветными мелкими пятнышками на изображении эмиссии $\lambda 557,7$ нм отмечены положения приемных станций GPS как в южной полусфере, так и в северной полусфере, сопряжен-

ных по магнитным силовым линиям. Этот пример данных из [Prikrýl et al., 2013] свидетельствует о корреляции механизмов фазовых сцинтилляций с эмиссиями в авроральных структурах и структурой высыпаний авроральных электронов. Из рассмотренных примеров напрашивается вывод, что для более прецизионных исследований взаимосвязи механизмов сцинтилляций со структурой высыпаний частиц и авроральными явлениями необходимы мелкомасштабные координированные измерения с орбиты высыпающихся заряженных частиц, магнитного и электрического поля и интенсивности эмиссий, имеющих максимумы интенсивности в E- и в F-слое ионосферы, в районах, где сигналы навигационных систем протыкают последовательности авроральных структур.

Характерный пример амплитудной сцинтилляции в северной полярной области представлен в монографии [Hunsucker, and Hargreaves, 2003] на Fig. 9.16 и 9.17 (в данной работе не показаны). На Fig. 9.17 показана «метрика» сигнала на частоте 16,8 МГц, зафиксированная 4 ноября 1993 в 05.56 UT на пути распространения между пунктами Wales и Fairbanks, а на Fig.9.16 показан путь распространения, проекция которого наложена на изображение аврорального овала, полученное сканирующей системой OLS (в широком спектре) на спутнике DMSP во время мощной геомагнитной бури (National Space Weather Event 3–11 Nov.1993), детальные характеристики которой можно увидеть в [Knipp et al., 1998]. Даже относительно низкое пространственное разрешение оперативной системы линейного сканирования OLS позволило «видеть» несколько крупномасштабных авроральных структур, пересекаемых сигналом.

Физическая причинно-следственная связь сцинтилляций радиосигналов в полярной ионосфере с оптическими эмиссиями, возбуждаемыми в полярных сияниях, является косвенной. Источником возбуждения эмиссий и неоднородностей электронной концентрации, приводящим к сцинтилляциям, являются высыпающиеся электроны и протоны. Возбужденные состояния составляющих ионосферы и верхней атмосферы при ударе электрона с энергией в диапазоне от нескольких эВ до десятков эВ, имеют различные времена жизни до релаксации. Некоторые из них, как например эмиссии первой отрицательной системы иона молекулы азота ($E_{\text{возб}} > 19$ эВ, $\lambda_{391,4}$; 427,8 и 470,9 нм), «высвечиваются» практически мгновенно (время жизни их возбужденных уровней несколько десятков наносекунд) и поэтому являются прямыми индикаторами процессов высыпаний заряженных частиц, а интенсивность эмиссий прямо пропорциональна потоку энергии электронов [Rees et al., 1974; Steel et al., 1990]. Как следствие, изображения распределений интенсивности эмиссий первой отрицательной системы $1NG(N_2^+)$ отображают мгновенные распределения градиентов электронной концентрации и потока энергии высыпающихся электронов в максимуме E-области ночной полярной ионосферы [Vondrak et al., 1985], причем связь интенсивности вышеупомянутых эмиссий первой отрицательной системы N_2^+ с потоком энергии электронов (в максимуме E-области) более корректна из-за короткого времени жизни.

Ряд других авроральных эмиссий и особенно интенсивные кислородные эмиссии ($\lambda_{630,0}$ нм и $\lambda_{557,7}$ нм) подходят для картографирования и диагностики средней энергии высыпающихся электронов по их отношению к интенсивности $\lambda_{427,8} N_2^+$ [Rees et al., 1974; Steel et al., 1990]. При этом морфологическая структура

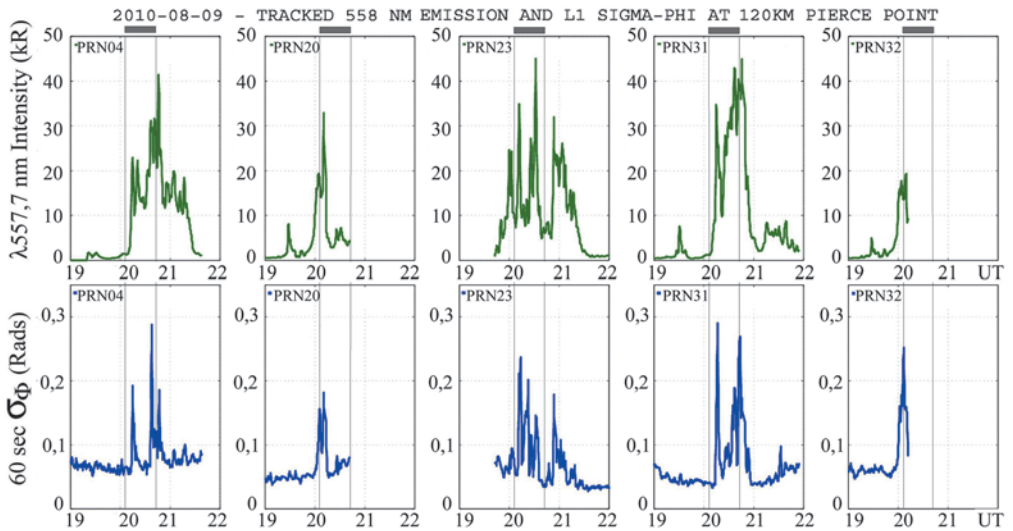


рис. 3. Адаптирован из Fig. 6 [Kinrade et al., 2013]. Выбранные за период 19–22 UT 9 августа 2010 г. примеры корреляций индекса фазовых сцинтилляций σ_ϕ (нижняя панель) сигналов конкретных спутников PRN GPS L1 с усредненной интенсивностью кислородной линии $\lambda 557,7$ нм в точках протыкания сигналами GPS на высоте эмиссии 120 км (верхняя панель).

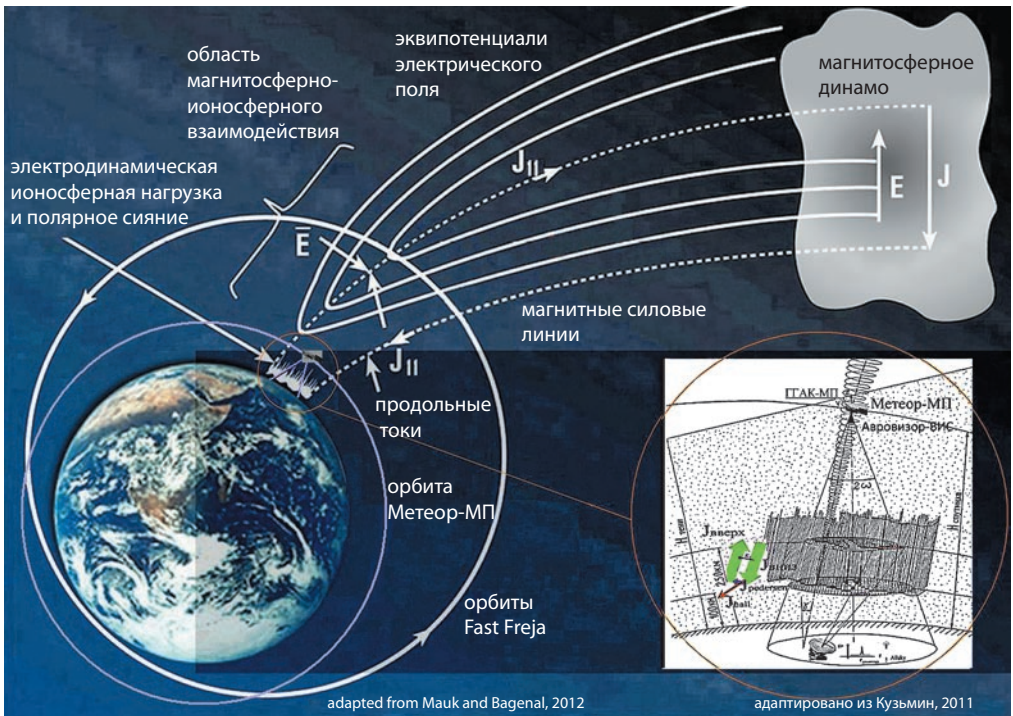


рис. 4. Адаптирован из [Mauk et al., 2012] и [Кузьмин, 2011]. Фронтальная проекция ближней магнитосферы, процессы взаимодействия с полярной ионосферой, орбита перспективного КА Метеор-МП, геометрия спектрофотометрических наблюдений авроральных эмиссий аппаратурой Авровизор-ВИС/МП.

наблюдаемых эмиссий, имеющих максимумы интенсивности в E- и F- областях ионосферы, может использоваться для пространственной «привязки» позиций точек протыкания скинтиллирующих радиосигналов к конкретным авроральным формам. Во всех работах, посвященных корреляционной статистике скинтилляций навигационных сигналов с авроральными эмиссиями, решалась именно эта задача морфологической привязки, а исследования связи скинтилляций с прямо измеренными энергетическими характеристиками высыпающих частиц на низкоорбитальных КА проводились ограниченно (см. например [Prikryl et al., 2013]). С восстановленными (из распределений интенсивности эмиссий, наблюдаемых с поверхности Земли) средней энергией и потоком энергии электронов, за редким исключением [Garner et al., 2011], сравнения не проводились.

Для исследований этих зависимостей предполагается проведение координированных наблюдений эффектов скинтилляций с прямыми измерениями энергетических распределений высыпающих электронов и протонов, мелко-масштабных градиентов магнитного и электрического поля, и дистанционными оптическими измерениями интенсивности эмиссий с помощью гелиогеофизического комплекса приборов ГТАК–МП на орбите перспективного КА Метеор-МП (см. рис. 4, адаптированный из [Mauk et al., 2012; Кузьмин, 2011]), а также наземными all-sky камерами, расположенными в полярных областях. Условная геометрия таких координированных наблюдений показана на рис. 5.

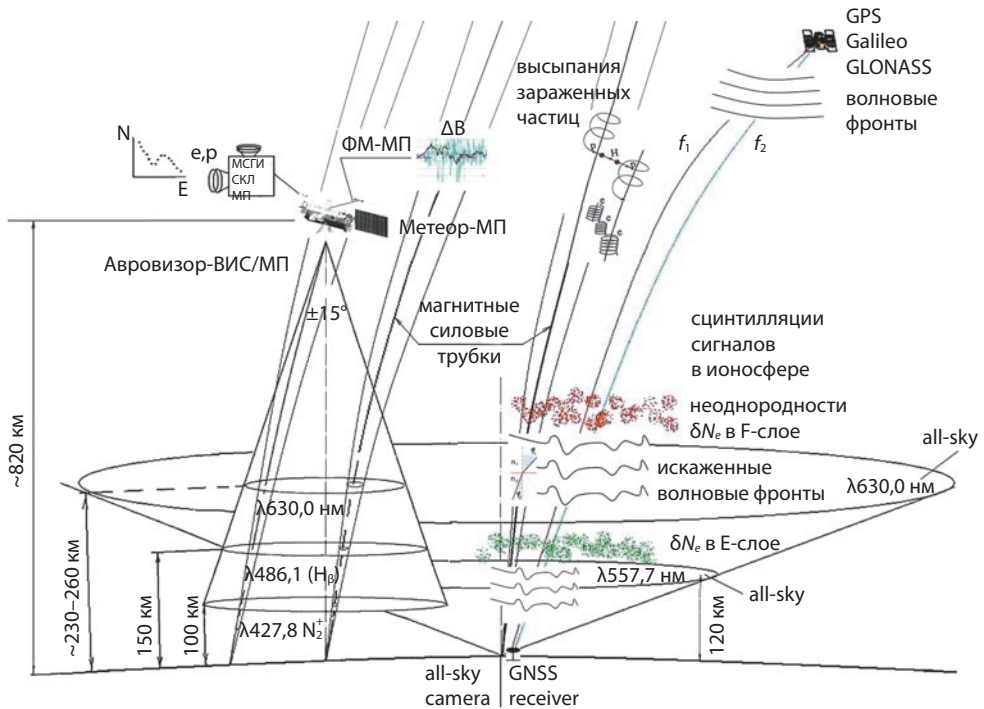


рис. 5. Геометрия оптических наблюдений авроральных эмиссий с поверхности Земли (All-sky) и с орбиты перспективного КА Метеор-МП. Схематическое изображение распространения волн в среде ионосферных неоднородностей, влияющих на скинтилляций сигналов навигационных систем, принимаемых системой GNSS.

Для имаджера Авровизор-ВИС/МП намечено использовать фотометрическую модель (рассмотренную далее) получения серии последовательных перекрывающихся изображений авроральных структур (рис. 7) [ДЭП, 2015]. Реконструкция последовательных плоских изображений на основе развития алгоритмов SIRT и MART, отлаженных при реконструкциях наземных авроральных изображений, полученных с разных точек триангуляции (см. например [Aso et al., 1993]), позволит получать объемные изображения эмиссий и уточнять 3D координаты локаций точек протыкания (IPP) слоев ионосферы радиосигналами при приеме сигналов от конкретных спутников навигационных систем, проходящих через конкретные фрагменты авроры.

В таком координированном эксперименте будут контролироваться: энергетические потери высыпающихся электронов и протонов и их вторичной электронной продукции как в подножных точках магнитной силовой линии на высотах эмиссий E- и F-области ионосферы, так и по всей наблюдаемой «площадке», имеющей диаметр около 380 км на высоте E-области, картографироваться мелкомасштабные (сотни метров) градиенты интенсивности эмиссий на разных высотах, включая: $\lambda 427,8(N_2^+)$, $\lambda 630,0 [OI]$, более крупномасштабные градиенты интенсивности β -линии Бальмеровской серии водородной эмиссии $\lambda 486,1$ нм прямо отражающей высыпания протонов, а также градиенты электронной концентрации в максимуме E-области ионосферы [Vondrak et al., 1985].

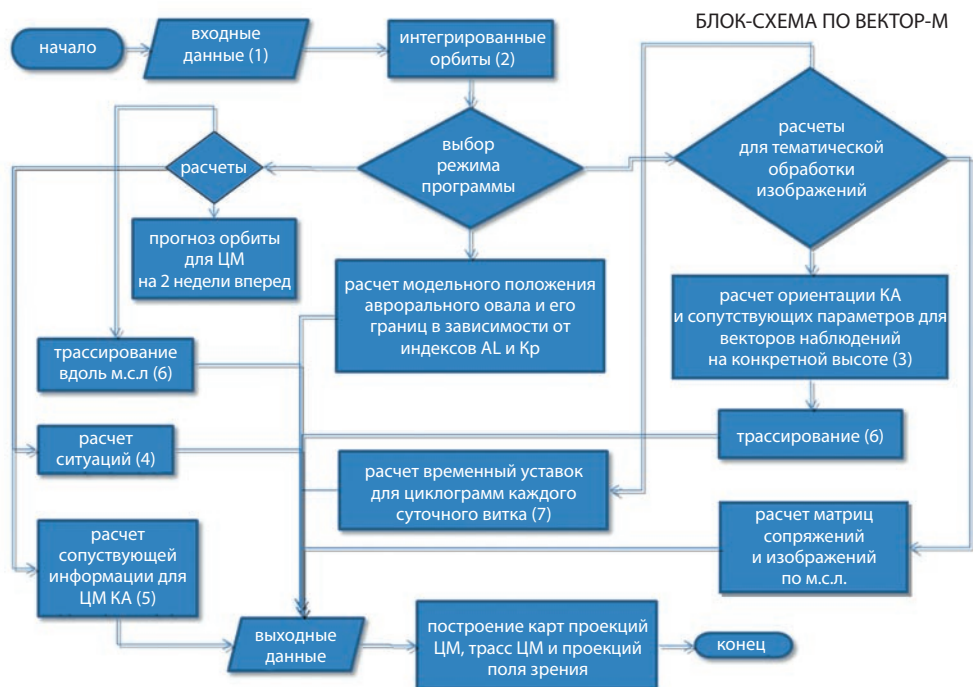


рис. 6. Блок-схема диалогового ПО Вектор-М, создаваемого для управления процессом измерений распределений интенсивности эмиссий полярных сияний авроральным имаджером Авровизор-ВИС/МП с орбиты КА Метеор-МП, и для последующей тематической обработки авроральных изображений после сброса информации на Землю.

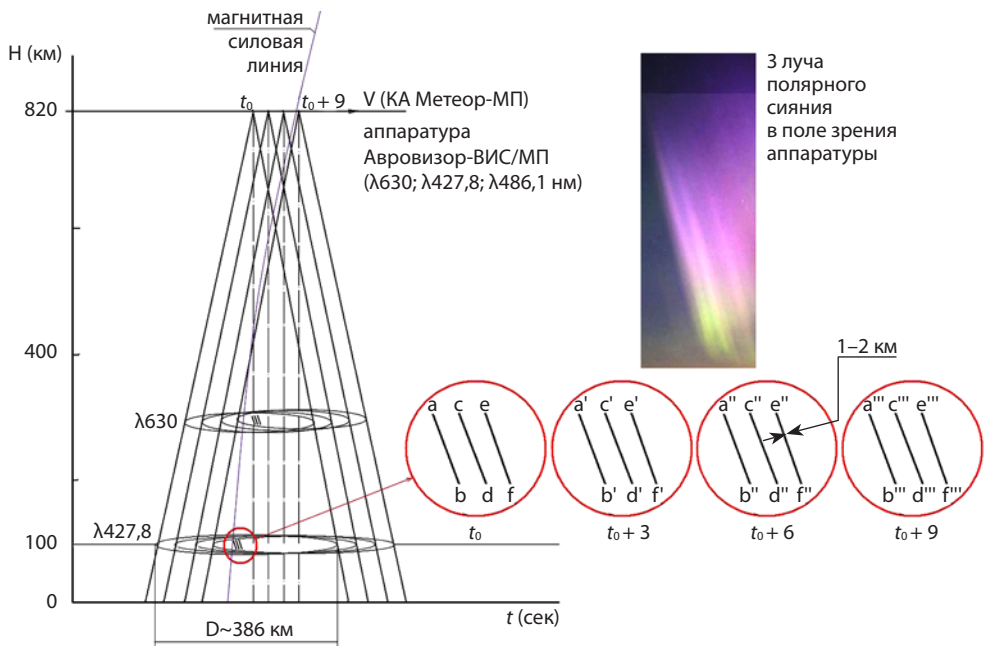
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАВАЕМОГО АВРОРАЛЬНОГО ИМАДЖЕРА АВРОВИЗОР–ВИС/МП И ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЪЕМКИ

В 2015 г. специалисты ИКИ РАН и ЦАО Росгидромет совместно с РКС (при участии НИИТМ ТГУ, ПГИ РАН и НПП «Астрон электроника») выполнили Дополнительный эскизный проект (ДЭП) Аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП [ДЭП, 2015], входящего в состав гелиогеофизического комплекса приборов (ГГАК–МП) перспективного КА Метеор-МП. Этот КА должен быть запущен в следующем десятилетии на стандартную солнечно-синхронную полярную орбиту с высотой ~ 830 км (рис. 5). Основные характеристики аппаратуры Авровизор-ВИС/МП показаны в таблице 1 для сравнения с характеристиками двух зарубежных аналогов (авроральных имаджеров видимого диапазона МАС [Obuchi et al., 2008] и FAI [Cogger et al., 2014]).

Из таблицы 1 можно увидеть, несколько существенно важных характеристик Российского имаджера: а) три параллельных канала настроены на измерения трех эмиссий ($\lambda 630,0$ [OI], $\lambda 427,8$ (N_2^+) и $\lambda 486,1$ (H_β)) нм соответственно, угол зрения каждого канала обеспечивает (благодаря прецизионной ориентации КА на Землю) попадание в поле изображения проекции магнитной силовой линии, пересекаемой КА Метеор-МП в момент его экспозиции, на высоту эмиссии; наличие канала, измеряющего распределение интенсивности водородной линии, позволяет контролировать среднюю энергию высыпающихся протонов одновременно с характеристиками высыпающихся электронов, контролируемых в двух других каналах [Кузьмин, 2011; Козелов и др., 2002].

В состав ГГАК–МП, кроме аврорального имаджера, входят тороидальные анализаторы энергетических спектров заряженных частиц (прибор МСГИ–МП) и измеритель магнитного и электрического поля ФМ–МП. В [ДЭП, 2015] показана реальность достижения пространственного разрешения $\sim 1,5$ (вдоль вектора скорости) $\times 0,5$ км (поперек вектора скорости) и временного разрешения $\sim 0,1$ – $0,2$ сек при измерениях эмиссий $\lambda 427,8$ (N_2^+) и $\lambda 630,0$ [OI] в авроральных структурах во время суббурь, и $\sim 9 \times 5$ км и $\sim 0,5$ – $0,7$ сек при измерениях водородной эмиссии (H_β). Комплекс приборов ГГАК–МП нацелен на мониторинг и исследования мелкомасштабных характеристик высыпающихся заряженных частиц, особенностей распределений интенсивности эмиссий в авроральных структурах и продольных токов и электрического поля в различных геомагнитных условиях.

Для расчетов точек протыкания (IPP) слоя ионосферы конкретными радиолучами конкретных навигационных КА, морфологической «привязки» по магнитному полю к конкретной авроральной структуре (трассирования вдоль магнитной силовой линии до высоты максимума интенсивности конкретной эмиссии), для расчета сопряжений изображений интенсивности разновысотных эмиссий (например, $\lambda 427,8$ и $\lambda 630,0$ нм), измеряемых аппаратурой Авровизор-ВИС/МП, намечено использовать ПО Вектор-М [Баньщикова и др., 2012, 2013], функциональная блок-схема которого показана на рис. 6.



адаптировано из Кузьмин и др., 2015

рис. 7. Адаптирован из [ДЭП,2015]. Разноракурсная фотометрическая модель наблюдения авроральных структур с помощью аппаратуры Авровизор-ВИС/МП с орбиты перспективного КА Метеор-МП.

МОДЕЛЬ СЪЕМКИ

Фотометрическая модель съемки полярных сияний аппаратурой Авровизор-ВИС/МП с орбиты КА Метеор-МП базируется на получении последовательности разноракурсных квазимонохроматических плоских стереопар изображений сцены (полярного сияния) (рис. 7) в течение интервала времени пересечения спутником неосвещенной полярной зоны, включающей субавроральную зону, авроральный овал и полярную шапку. В зависимости от конкретных геомагнитных условий этот интервал времени может составлять от 1 до 15 минут. За единичный интервал наблюдений принимается период времени, за который поле наблюдения в канале 2 ($\lambda 427,8$ нм) имаджера на высоте 100 км обновляется полностью. Исходя из конусного угла поля зрения ($\pm 15^\circ$, см. таблицу 1), геометрии наблюдений (рис.6,7), при которой оси зрения каналов направлены в нади́р, и линейной скорости КА $V \approx 7,44$ км/сек при круговой орбите на высоте ~ 820 км, величина единичного интервала наблюдений получается равной ~ 52 сек. В этом интервале времени серия последовательных пар перекрывающихся изображений, полученных за время экспозиции, образует стереопары, которые отражают один и тот же фрагмент авроральной структуры с разных угловых позиций (под разными зенитными и азимутальными углами). Согласно упрощенной формуле [Berkowitz, 1998] стереобазис аппроксимируется в виде

$$B \approx 0,03 \times L$$

$$(1), \text{ где } L \text{ (расстояние до объекта)} \approx 720 \text{ км.}$$

Тогда при геометрии наблюдений аппаратурой Авровизор-ВИС/МП (канал 2) на расстоянии равном мгновенному диаметру наблюдаемого поля (386 км на высоте 100 км) укладывается ≈ 18 стереобазисов **В**. Согласно требованиям стереосъемки (1) необходимая скважность съемки $52/18 \approx 2,89$ сек, т. е. приблизительно 1 изображение в 3 сек. На рис. 7 условно показана геометрия наблюдений (в каналах 1 и 2 аппаратуры Авровизор-ВИС/МП с высоты орбиты КА Метеор-МП) стереопар изображений трех лучей полярного сияния со скважностью съемки 3 сек. В рамках описания связи между координатами точек в 3-мерном пространстве и их проекциями на плоскость изображения детектора изображения в камере-обскура с диафрагмой конечного диаметра такая модель съемки позволит использовать последовательности наблюдаемых с орбиты плоских изображений эмиссий (или их фрагментов) для достоверных преобразований в 3-мерный фрагмент структуры полярного сияния. При этом подразумевается, что смаз изображения за время экспозиции, получающийся за счет скорости КА, уже частично компенсирован с помощью переноса строк в детекторе изображения и дополнительно откорректирован с помощью математических методов. Последовательная регистрация серии стереопар изображений авроральных эмиссий с орбиты и их реконструкция позволит «видеть» структуру свечения полярного сияния с учетом геометрической дисторсии (в рамках угла поля зрения) и локальной дисторсии, возникающей за счет изменения (в пределах нескольких градусов) угла наклона магнитной силовой линии (к направлению в надир), проходящей через конкретный элемент фрагмента изображения на конкретной высоте. Одновременные изображения авроральных эмиссий, полученные с орбиты (один суточный виток из 15) и с поверхности Земли с нескольких точек (например, с помощью пар изображающих камер сети MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) [Kozelov, 2014], расположенных примерно в 4х км (FOV $\sim 18^\circ$) и в 86 км (all-sky камеры) друг от друга в окрестности г. Апатиты (ППИ РАН) позволят уточнять наблюдаемую структуру объемов конкретных авроральных фрагментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мелкомасштабные авроральные изображения эмиссий полярной верхней атмосферы и ионосферы отражают морфологическую структуру и энергетические характеристики высыпающихся частиц. Высыпания энергичных частиц создают неоднородности электронной концентрации в ионосферной плазме на различных высотах, которые препятствуют нормальному распространению трансполярных сигналов космических систем связи и навигации. Координированные измерения сигналов в субавроральной и авроральной зонах, в полярной шапке и области каспа с наземными изображениями интенсивности эмиссий показывают статистически подтверждаемую корреляцию сцинтилляций сигналов в случае протыкания радиолучами конкретных авроральных структур или серий структур. Для исследования механизмов воздействия условий возмущенной среды на распространение сигналов сквозь структуры полярных сияний предлагается использовать бортовой авроральный имаджер на перспективном КА Метеор-МП,

который разрабатывается для гелиогеофизического комплекса приборов ГТАК–МП. Характеристики аврорального имаджера Авровизор–ВИС/МП в некоторых позициях превосходят характеристики зарубежных аналогов орбитальных авроральных имаджеров видимого диапазона. Представленная разноразмерная фотометрическая модель наблюдений авроральных эмиссий с орбиты, создаст условия для реконструкции серии последовательных плоских изображений в объемные изображения измеряемых эмиссий, которые позволят более корректно «привязывать» точки протыкания сигналов к конкретным авроральным структурам на разных высотах, что несомненно увеличит возможности анализа событий для дальнейших исследований природы сцинтилляций сигналов и их связи с мелкомасштабными неоднородностями ионосферы.

АППЕНДИКС

1. Интенсивность амплитудных сцинтилляций обычно измеряется величиной, называемой индексом S_4 или индикатором S_4 [Jiao and Morton, 2015], которая является отношением стандартного отклонения мощности сигнала к средней мощности сигнала, рассчитанной за период времени. Иногда этот индекс называют σ_I индексом мерцаний интенсивности сигнала [Блаунштейн и др., 2013], он определяет нормированную величину флуктуирующего сигнала. Интенсивность сцинтилляций связана с размахом сцинтилляций P , зависящим от конкретного распределения.

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}, \text{ где } I - \text{ мощность (интенсивность) сигнала, где скобки указывают на усреднение по ансамблю, обычно за период времени } = 60 \text{ сек.}$$

2. Фазовые флуктуации в измерениях выражаются стандартным отклонением сигнала (с исключенным трендом) фазы несущей ϕ в радианах сигнала (индекс или индикатор $\sigma_\phi = std(\delta\Phi) = \sqrt{\langle \Phi^2 \rangle - \langle \Phi \rangle^2}$), усредненным за 60 сек. Для исключения тренда используют электронный фильтр Баттерворда низких и высоких (6-го порядка) частот с обрезанием частоты 0,1 Гц.
3. Соответствие частот приемников GPS и Glonass: L1 (1575,42 МГц); L2/L2Y (1227,60 МГц); L2C (1227,5 МГц); L5 (1176,45 МГц); L2P Glonass (1242–1248 МГц); L1CA Glonass (1598–1605 МГц); L3 (1381,05 МГц).

ЛИТЕРАТУРА

- [Баньщикова и др., 2012] Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте Авровизор–ВИС/МП на КА Метеор–МП // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. №10/2. С.106–111.

- [Баньщикова и др., 2013] Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А. К. Предварительные результаты расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для эксперимента с прибором Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА Метеор-МП // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. № 10/2, С.174-180.
- [Блаунштейн и др., 2013] Блаунштейн Н., Пулинец С.А. Коэн Я. Расчет основных параметров радиосигналов в канале спутник-Земля при распространении через возмущенную ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 2. С. 215-227.
- [ДЭП, 2015] ДЭП (Дополнение к эскизному проекту на ГТАК-МП в части трехканального имаджера видимого диапазона Авровизор-ВИС/МП). Пояснительная записка ЦИНВ. 412125.005, РКС, 2015, 163 с.
- [Козелов, 2000] Козелов Б.В. Фрактальные характеристики пространственной структуры полярных сияний // Монография. Физика околоземного пространства. КНЦ ПГИ РАН, Апатиты, 2000. Гл. 3-4. §3.4. С. 572-597.
- [Козелов и др., 2002] Козелов Б.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высыпаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потоков частиц // Геомагн.Аэроном. 2002. Т. 42. № 4. С. 513-518.
- [Колосов и др., 1969] Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. Изд. Связь, 1969, 156 с.
- [Кузьмин, 2011] Кузьмин А.К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит зарубежных и перспективных российских КА. Пр-2161. М.: ИКИ РАН, 2011, 49 с.
- [Aso et al., 1993] Aso T., Muguruma K., Yabu T., Hashimoto T., Abe M., Eijiri M. A note on the computed auroral tomography by the MART method // Sci. Rep. Inst.for Rymdfysik, Kiruna, Sweden, 1993. 213, P. 23-33.
- [Basu et al., 1998] Basu S., Weber E.J., Bullet T.W., Keskinen M.J., Mackenzie E., Doherty P., Sheehan R., Kuenzler H., Ning P., Bongiolatti J. Characteristics of plasma structuring in the cusp/cleft region at Svalbard // Radio Sci. 1998. V. 33, P. 1885-1900.
- [Basu et al., 2002] Basu S., Grovesa K., Basu S, Sultana P. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans // Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2002. V. 64, P. 1745-1754.
- [Béniguel et al., 2009] Béniguel Y., Romano V., Alfonsi L., Aquino M., Bourdillon A., Cannon P., De Franceschi G., Dubey S., Forte B., Gherm V., Jakowski N., Materassi M., Noack T., Pozoga M., Rogers N., Spalla P., Strangeways H. J., Warrington E. M., Wernik A., Wilken V., Zernov N. Ionospheric scintillation monitoring and modeling // Ann.Geophys. 2009. V. 52. № 3-4. P. 391-416. DOI: 10.4401/ag-4595.
- [Berkovitz, 1998] Berkovitz J. Image-side perspective and stereoscopy // Proceedings of SPIE. 1998. V. 3295. P. 288-298.
- [Cogger et al., 2014] Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // Space Sci. Rev. 2014. V. 189, P. 15-25. DOI: 10.1007/s11214-014-0107-x.
- [Coker et al., 2004] Coker A.S., Bust G.S., Doe R.A., Gaussirian II T.L. High-latitude plasma structure and scintillation // Radio Sci., 39. 2004. issue 1, RSIS1. DOI: 10.1029/2002RS002833.
- [Conker et al., 2003] Conker R.S., El-Arini M.B., Hagarty C.J., Hsiao T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS satellite-based augmentation system availability // Radio Sci. 2003. V. 38. № 1. P. 1-23.

- [Dashkevich et al., 2006] *Dashkevich Zh.V., Zverev V.L., Ivanov V.E.* Ratios of the I630/I427,8 and I557,7/I427,8 emission intensities in auroras // *Geomagn. Aeronom.* 2006. V. 46, № 3, P. 366-370.
- [Datta-Barua et al., 2003] *Datta-Barua S., Doherty P.H., Delay S.H.* Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS Positioning // *Proceeding of the ION GPS.* 2003. Portland, OR, September 9–12. P. 336-346.
- [Forte et al., 2004] *Forte B. and Radicella S.M.* Geometrical control of scintillation indices: What happens for GPS satellites // *Radio Sci.* 2004. V. 39. RS5014. P. 1-13. DOI: 10.1029/2002RS002852.
- [Fritz et al., 2015] *Fritz B., Lessard M., Cogger L., Yau A., Knudsen D., Spanswick E., Donovan E., Howarth A.* E–POP observations of pulsating aurora. Univ. New Hampshire, Posters.unh.edu/.../POSTER–GEM–ePOP.pptx. 2015.
- [Garner et al., 2011] *Garner T.W., Harris R.B., York J.A., Herbster C.S., Minter III C.F., Hampton D.L.* An auroral scintillation observation using precise, collocated GPS receivers // *Radio Science.* 2011. V. 46. RS1018. DOI: 10.1029/2010RS004412.
- [Homam et al., 2013] *Homam M.J., Warrington E.M., Stocker A.J.* Phase scintillations at the polar ionosphere // *Proceeding of the IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, 1–3 July 2013, Melaka, Malaysia. P. 1-5.
- [Hosokawa et al., 2014] *Hosokawa K., Otsuka Y., Ogawa Y., Tsugawa T.* Observations of GPS scintillation during an isolated substorm // *Progress in Earth and planetary Science.* 2014. V. 1, P. 1-16.
- [Hunsucker et al., 2003] *Hunsucker R.D., and Hargreaves J.K.* The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge Univ., UK, 2003. 617 p.
- [Jiao et al., 2013] *Jiao Yu., Morton Yu.T., Taylor St., Pelgrum W.* Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals // *Radio Science.* 2013. V. 48, P. 698-708. DOI: 10.1002/2013RS005259.
- [Jiao et al., 2015] *Jiao Yu. and Morton Yu.T.* Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24 // *Radio Sci.* 2015. V. 50, P. 886-903. DOI: 10.1002/2015RS005719.
- [Kent, 1959] *Kent G.S.* High frequency fading observed on the 40 Mc/s wave radiated from artificial satellite 1957a // *Journ. Atmos. Terr. Phys.* 1959. V. 16. P. 10-20.
- [Kinrade et al., 2013] *Kinrade J., Mitchell C.N., Smith N.D., Ebihara Y., Weatherwax A.T., Bust G.S.* GPS phase scintillation associated with optical auroral emissions: First statistical results from the geographic South Pole // *Journ. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2490-2502. DOI: 10.1002/jgra.50214.
- [Kintner et al., 2007] *Kintner P.M., Ladvina B.M., Paula E.R. de.* GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather.* 2007. V. 5. S09003. DOI: 10.1029/2006SW000260.
- [Klobuchar, 1987] *Klobuchar J.* Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES–23(3), 1987. P. 325-331. DOI:10.1007/pl00012846.
- [Knight, 2000] *Knight M.F.* Ionospheric scintillation effects on global positioning system receivers // *Thesis of Doctor Philosophy, Adelaide, South Australia.* 2000. – 304 p.
- [Knipp et al., 1998] *Knipp D.J., Emery B.A., Engebretson M., Li X., McAllister A. H., Mukai T., Kokubun S., Reeves G.D., Evans D., Obera T., Pi X., Rosenberg T., Weatherwax A., McHarg M.G., Chun F., Mosely K., Codrescu M., Lanzerotti L., Rich F., Sharber J., Wilkinson P.* An overview of the early November 1993 geomagnetic storm // *Journ. Geophys. Res.* 1998. V. 103. A11. P. 26197-26220.
- [Kozelov, 2003] *Kozelov B.V.* Fractal approach to description of the auroral structure // *Annales Geophysicae.* 2003. V. 21. P. 2011-2023.

- [Kozelov, 2014] *Kozelov B.V.* MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) auroral cameras: overview of events observed during last winter seasons // Proceeding of the 10th Intl Conf. “Problems of Geocosmos”. Oct. 6–10, 2014, St-Petersburg, Russia. P. 328-333.
- [Li et al., 2010] *Li G., Ning B., Ren Z.* Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions of solar minimum // *GPS solute*. 2010. V. 14. P. 331-341.
- [Lui et al., 2015] *Lui A.T.Y., Cogger L.L., Howarth A., Yau A.W.* First satellite imaging of auroral pulsating by the Fast Auroral Imager on e-POP // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 6877-6882. DOI: 10.1002/2015GL065331.
- [Mauk et al., 2012] *Mauk B. and Bagenal F.* Comparative auroral physics: Earth and other planets. *Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes*. From series *Geophysical Monograph*, AGU, Washington, DC, 2012. V. 197. P. 3-28.
- [Meerin et al., 2015] *Meerin C.van der, Oksavik K., Lorentzen D.A., Rietveld M.T., Clausen B.N.* Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*. 2015. V. 120. P. 10612-10621. DOI: 10.1002/2015JA021819.
- [Meng et al., 1986] *Meng C.-I., Huffman R.E., Scrivanek R.A., Strickland D.J., Daniell R.E., Jr.* Remote sensing of ionosphere by using ultraviolet and visible emissions // *Proceedings of SPIE. Ultraviolet Technology*. 1986. V. 687. P. 62-72.
- [Obuchi et al., 2008] *Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N.* Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite // *Earth Planets Space*. 2008. V. 60. P. 827-835.
- [Oksavik et al., 2015] *Oksavik K., Meerin C.Van der, Lorentzen D.A., Baddely L.J., Moen J.* Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*. 2015. V. 120. P. 9161-9175. DOI: 10.1002/2015JA021528.
- [Paxton et al., 1992] *Paxton L.J., Meng C.-I., Fountain G.H., Ogorzalek B.S., Darlington E.H., Goldsten J., Peacock K.* SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters // *Ultraviolet Technology IV, SPIE*. 1992. V. 1764. P. 161-176.
- [Prikryl et al., 2013] *Prikryl P., Zhang Y., Ebihara Y., Ghoddousi-Fard R., Jayachandran P.T., Kinrade J., Mitchell C.N., Weartherwax A.T., Bust G., Cillers P., Spogli L., Alfonsi L., Romano V., Ning B., Li G., Jarvis M.J., Danskin D.W., Spanswick E.* An interhemispheric comparison of GPS scintillation with auroral emission observed at the South Pole and from DMSP satellite // *Radio Sci.* 2013. V. 56, 2, R0216. P. 1-15. DOI: 10.4401/ag-6227.
- [Rees et al., 1974] *Rees M.H. and Luckey D.* Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations // *Journ. Geophys. Res.* 1974. V. 79. № 34, P. 5181-5186.
- [Rino, 1979] *Rino C.L.* A power law phase screen model for ionospheric scintillation 1. Weak scatter // *Radio Sci.* 1979. V. 14. № 6. P. 1135-1145.
- [Scone et al., 2008] *Scone S., Man F., Ghafoori F., Tiwari R.* Investigation of scintillation characteristics fro high latitude phenomena // *Proc. ION GNSS 2008, Session D5, Savannah, GA, 16–19 Sept. 2008*. P. 2425-2433.
- [Spogli et al., 2011] *Spogli L., Alfonsi L., Franceschi G. de, Romano V., Aquino M.H.O., Dodson A.* Climatology of GNSS ionospheric scintillation at high latitudes. URL: <http://www.earth-prints.org/.../1/1745104spogli.pdf>.
- [Steel et al., 1990] *Steel D.P., and McEwen D.J.* Electron auroral excitation efficient and intensity ratios // *Journ. Geophys. Res.* 1990. V. 95, A7. P. 10321-10336.

- [Tsunoda, 1988] *Tsunoda R.T.* High-latitude F-region irregularities: a review and synthesis // *Rev. Geophys.* 1988. V. 26. P. 719-760.
- [Vondrak et al., 1985] *Vondrak R., Murphree J.S., Anger C.D.* Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer // *Radio Science.* 1985. V. 20. № 3. P. 439-446.
- [Yeh et al., 1982] *Yeh C. and Liu C.H.* Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proc. IEEE,* 70. 1982. P. 324-360.

CHARACTERISTICS OF THE DEVELOPING IMAGER AUROVISOR–VIS/MP AND PERSPECTIVE USE OF AUROREAL IMAGES FOR RESEARCH OF POLAR IONOSPHERIC PROCESSES AND OPTICAL MONITORING IRREGULARITIES OF CONDITIONS THAT AFFECT TO SIGNAL PROPOGATION

A.K. Kuzmin¹, M.A. Bانشchikova², Yu.S. Dobrolenskiy¹, G.M. Kruchenitskiy³, I.A. Maslov¹, A.M. Merslyi¹, P.P. Moiseev⁴, Yu.N. Potanin³, I.N. Chuvashov²

¹ Space Research Institute of Russian Academy of Science (IKI RAN)

² Scientific Research Institute Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk Government University (NII PM TGU)

³ Central Aerological Observatory of Roshydromet («CAO» Roshydromet)

⁴ Scientific-production enterprise “Astron Elektronika” (NPP “Astron Elektronika”)

Characteristics of developing auroral imager Aurovisor-VIS/MP for onboard heliogeophysical instrumental complex of perspective spacecraft Meteor-MP are presented, and concise comparative analysis with foreign analogues are carried out. Criterion of choose of diverse view unified point photometric model of auroral structure imaging are discussed. Block-scheme of special software Vector-M created for planning and realize of orbital auroral observations, and geographical and geomagnetic gridding with taking into account of navigation and orientation data of spacecraft are presented. By means of examples of foreign results simultaneous observations of signal scintillations and all-sky auroral emissions correlations of scintillation of signals of navigation system in polar ionosphere are considered.

Keywords: polar ionosphere, auroral imager, auroral emissions, propagation of signals, scintillations.

Kuzmin Alexander Konstantinovich – main specialist, IKI RAN, PhD, alkkuzmin@mail.ru.

Bانشchikova Maria Alexandrovna – senior scientist, NII PM TGU, PhD, mba-tomsk@mail.ru.

Dobrolenskiy Yury Sergeevich – senior scientist, IKI RAN, PhD, dobrolenskiy@iki.rssi.ru.

Kruchenitskiy Grigory Mihaylovich – head of department, «CAO» Roshydromet, Doctor of physics and mathematics, professor, omd@cao-rhms.ru.

Maslov Igor Alexeevich – head of division, IKI RAN, imaslov@iki.rssi.ru.

Mērзlyy Alexey Mihaylovich – senior scientist, IKI RAN, PhD, pinega@list.ru.

Moiseev Pavel Petrovich – director of enterprise, NPP “Astron Elektronika”, astronel-moiseev.pp@yandex.ru

Potanin Yuriy Nikolaevich – senior scientist, «CAO» Roshydromet, PhD, oom@cao-rhms.ru.

Chuvashov Ivan Nikolaevich – junior researcher, NII PM TGU, chuvashovin@gmail.com.

РЕГИСТРАЦИЯ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Я.А. Сахаров¹, Ю.В. Катъкалов², В.Н. Селиванов³, А. Вильянен⁴

- ¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт» (ПГИ), г. Апатиты
- ² Институт космической физики (IRF), Швеция
- ³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Кольский научный центр Российской академии наук (КНЦ РАН), г. Апатиты
- ⁴ Финский метеорологический институт (FMI), Финляндия

В рамках проекта EURISGIC (European Risk from Geomagnetically Induced Currents) нами организована непрерывная регистрация геоиндуктированных токов (ГИТ) на пяти подстанциях энергосистемы на Северо-Западе России. В работе представлены результаты регистрации ГИТ в 2011–2015 гг., рассматриваются методы регистрации, сбора и представления информации, распределение максимальных значений токов от широты, уровня магнитной активности и локального времени, а также случаи возбуждения гармоник промышленной частоты в автотрансформаторах магистральной линии во время магнитосферных возмущений.

Данная работа частично выполнена при поддержке ЕС в рамках программы FP7/2007–2013, грант n260330.

Ключевые слова: космическая погода, магнитосферные возмущения, геоиндуктированные токи.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Земли является динамической системой, реагирующей на изменения параметров солнечного ветра. Динамическое равновесие между солнечным ветром и магнитосферой поддерживается сложной системой токов, текущих в магнитосфере. В периоды магнитосферных возмущений различные части магнитосферной токовой системы, в том числе кольцевой ток, ионосферные токи, токи в хвосте магнитосферы и на магнитопаузе испытывают значительные изменения. На поверхности Земли изменения магнитосферных токов проявляются в вариациях локального геомагнитного поля. Помимо этого, изменение во времени магнитосферных токов и токов в ионосфере возбуждает на поверхности Земли геоэлектрическое поле, которое может стать причиной развития токов в токопроводящих технологических сетях. Такие токи принято называть теллурическими или геоиндуктированными токами (ГИТ). Исследования характеристик возбуждения, максимальных величин, частоты

Сахаров Ярослав Алексеевич – зав. лаб. геофизических наблюдений, ПГИ, к.ф.-м.н., sakharov@pgia.ru.

Катъкалов Юрий Владимирович – инженер-исследователь, IRF, juri@katkalov.com.

Селиванов Василий Николаевич – зам.директора Центра физико-технических проблем энергетики Севера, КНЦ РАН, к.т.н., selivanov@ien.kolasc.net.ru.

Вильянен Ари – исследователь, ФМИ, ari.viljanen@fmi.fi.

появления ГИТ представляет интерес уже более 150 лет, с моментов первых проявлений ГИТ в протяженных телеграфных линиях. Ввиду возрастающей зависимости современной цивилизации от устойчивого обеспечения объектов инфраструктуры электроэнергией, топливом, связью, защита технологических систем от возможного пагубного воздействия ГИТ приобретает особенное значение. Комплекс параметров, описывающих состояние плазмы в околоземном космическом пространстве (применительно, в частности, к возможному их воздействию на техносферу) принято именовать космической погодой. В настоящее время исследования ГИТ как результата такого воздействия проводятся в 20 странах, проявление их установлено в линиях электропередач [Boteler et al., 1998], трубопроводах [Trichtchenko, Danskin, 2009; Sakharov et al., 2010], системах железнодорожной автоматики [Eroshenko et al., 2010; Сахаров и др., 2009]. Хотя активные исследования возбуждения ГИТ проводятся более 30 лет, задача защиты от негативных воздействий геомагнитных возмущений не решена окончательно. Во-первых, весьма сложен прогноз появления магнитных бурь во времени, во-вторых, разнообразно проявление эффектов бури в пространстве, в-третьих, каждая технологическая система по-своему откликается на магнитосферные возмущения. Требуется, с одной стороны, глобальный, планетарный подход к исследованию явления, а с другой стороны, необходимо изучение процессов развития и действия ГИТ в каждой конкретной системе.

Характер возбуждения ГИТ в той или иной системе зависит от ряда параметров, таких как протяженность, конфигурация, место расположения, в том числе широта расположения системы и ориентация ее проводящих частей, электрических параметров подстилающей поверхности, сопротивления самой системы и цепей заземления. Так, протяженные линии электропередач, характерные для единой энергосистемы, скажем, в России, практически представляют собой антенные системы, собирающие ГИТ в периоды геомагнитных возмущений. Из-за отличий каждой системы от подобных, существующих в других странах, результаты иных исследований возбуждения и воздействия ГИТ не могут быть слепо скопированы для применения в выбранной системе.

Именно поэтому сотрудниками исследовательских институтов КНЦ РАН в 2003 г. были начаты работы по систематическому исследованию ГИТ в региональной энергосистеме, расположенной в Карелии и на Кольском полуострове [Sakharov et al., 2007].

В 2011 г. международным коллективом была предпринята попытка расширить территориальный масштаб исследования ГИТ и связанных с ними процессов применительно к энергосетям до континентального уровня. Европейский Союз поддержал проект EURISGIC, нацеленный на оценку риска воздействия ГИТ на европейские энергосистемы [Viljanen et al., 2012]. Нам, как участникам проекта, удалось получить средства для организации и проведения непрерывной регистрации ГИТ на системе подстанций магистральной линии электропередач, расположенной на Северо-Западе России.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования величины ГИТ нами выбран метод регистрации почти постоянного тока в глухозаземленной нейтрали автотрансформаторов, установленных на подстанциях магистральной линии (330 кВ), расположенной в Карелии и на Кольском полуострове.

Такой подход позволяет проводить измерения ГИТ, не нарушая работы трансформатора и процесса распределения энергии.

Для проведения непрерывной регистрации ГИТ известно применение низкоомного шунта, устанавливаемого в цепи глухозаземленной нейтрали, (см. рис. 1), либо использование метода дифференциальной магнитометрии (см. рис. 2).

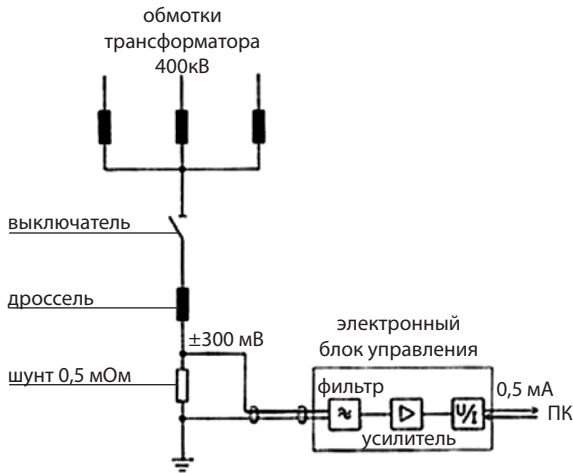


рис. 1. Измерение тока в нейтрали с использованием шунта [Elovaara et al., 1992].

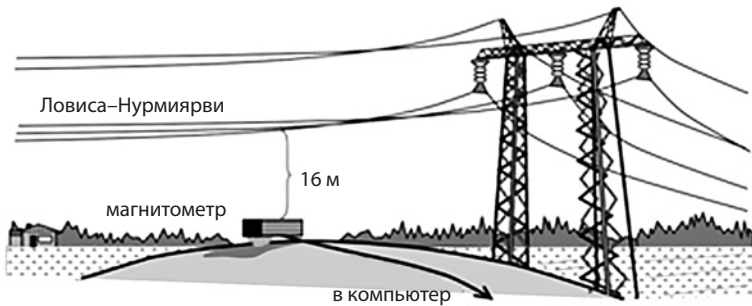


рис. 2. Измерение индуктированного тока с использованием двух магнитометров [Mäkinen, 1993; Viljanen and Pirjola, 1994].

Нами был выбран метод регистрации тока, протекающего по глухозаземленной нейтрали понижающего трансформатора. Для измерений был разработан специальный достаточно экономичный регистратор, позволяющий проводить измерения, не нарушая целостности цепей на подстанции [Баранник и др., 2012]. Блок-схема регистратора представлена на рис. 3.

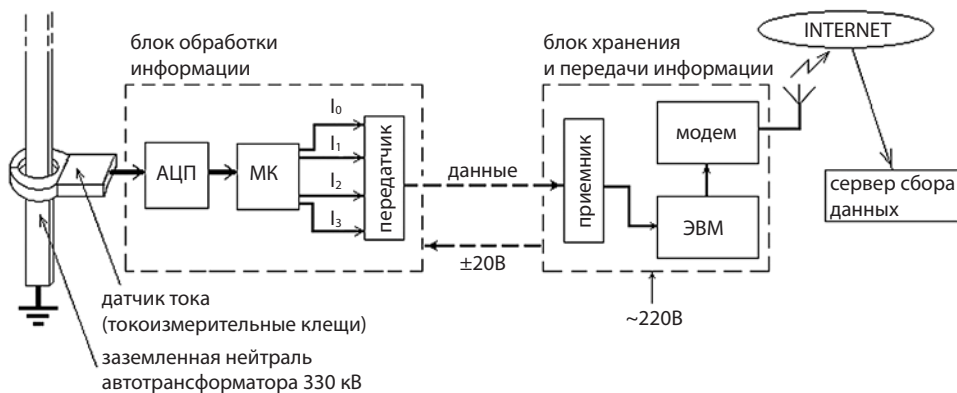


рис. 3. Блок-схема регистрирующего устройства.

Измерительным элементом регистратора являются клещи, работающие на эффекте Холла. Блок обработки информации, включающий АЦП (аналого-цифровой преобразователь) и МК (микроконтроллер), размещается в общем корпусе с клещами и устанавливается непосредственно на шине нейтрали, рис. 4. Измерительный блок термостатирован для повышения точности и стабильности измерений.

Технические условия на установку регистраторов были согласованы с энергораспределяющей компанией.

Текущая информация накапливается на компьютере сбора непосредственно на подстанции, после чего по выбранной программе (в нашем случае – один раз в час) данные передаются на сервер в ПГИ. Для передачи данных используется канал мобильной связи.

Пункты размещения регистраторов ГИТ и положение двух обсерваторий института указаны в таблице 1. На рис. 5 приведена схема расположения пунктов наблюдения в эксперименте и станций, данные которых доступны в архивах Финского метеорологического института.



рис. 4. Регистратор, закрепленный на заземляющей шине. Подстанция в г. Кондопога.

таблица 1. Положение измерительных устройств в эксперименте.

станция	географические		тип измерений
	широта	долгота	
Выходной	68,83	33,08	ГИТ ¹
Лопарская	68,63	33,25	МВС ²
Ревда	67,89	34,16	ГИТ
Ловозеро	67,97	35,02	МВС
Титан	67,53	33,44	ГИТ
Лоухи	66,08	33,12	ГИТ
Кондопога	62,22	ГИТ	

¹ ГИТ – геоиндуктированный ток

² МВС – магнито-вариационная станция

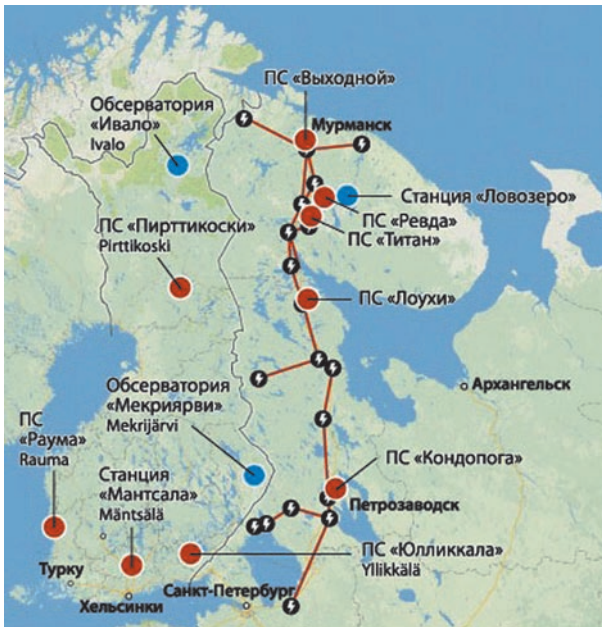


рис. 5. Схема расположения измерительных устройств на подстанциях линии электропередач.

Режим передачи данных устанавливается программно и при необходимости может быть изменен.

Получаемые данные с регистраторов ГИТ, а также магнитные данные обсерваторий Ловозеро, Ивалло, Меркриярви размещаются в специализированной базе данных. База данных, размещенная на сервере в Апатитах, снабжена дружественным интерфейсом, обеспечивающим доступ к данным из локальной сети института в режиме почти реального времени. Поступающие с системы сбора данные после необходимой децимации совместно с оценкой скорости изменения горизонтальных компонент геомагнитного поля представляются на сайте eurisgic.org в виде обзорных графиков. На этом же сайте доступен календарь выполненных наблюдений за весь период эксперимента (рис. 6).

Таким образом, для решения поставленной задачи регистрации ГИТ нами разработана оригинальная система непрерывной регистрации ГИТ на выбранных подстанциях магистральной линии 330 кВ энергосистемы «Карелэнерго».

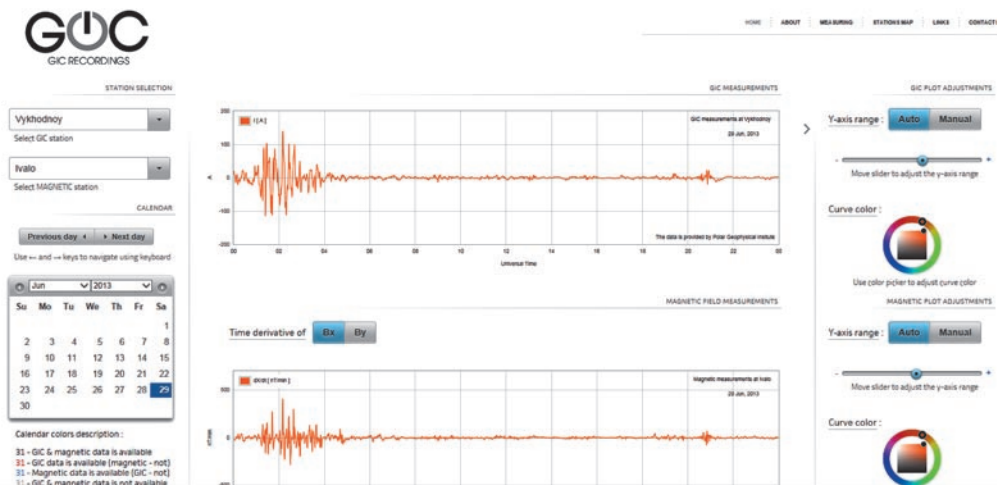


рис. 6. Скрин-шот сайта eurisgic.org, разработанного для представления текущей информации о проводимых наблюдениях.

Следует отметить, что на всех выбранных подстанциях (см. таблицу 1), за исключением ст. Кондопога, к линии электропередач подключены параллельно по два понижающих автотрансформатора со схемой соединения обмоток «звезда». Наши датчики располагаются на одном из двух трансформаторов, поэтому реально регистрируемый ток составляет половину ГИТ, наведенного в линии электропередач для данного узла.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ГИТ

Распределение максимальных значений токов от широты на выбранной сети станций приведено на рис. 7. Для получения однородных условий измерения на ст. Кондопога уменьшены в два раза.

На рис.8 приведено распределение максимальных часовых значений ГИТ для наиболее северной станции – Выходной, в зависимости от уровня магнитной активности, определяемой по Кр индексу.

Рисунок 9 представляет распределение максимальных значений амплитуды ГИТ, определенных для каждого часа, в различные моменты времени. Локальное время отличается от мирового на три часа, $LT = UT + 3$.

Представленные распределения максимальных значений ГИТ для различных широт, при различных уровнях магнитной активности и в зависимости от локального времени не противоречат известным из литературы. В авроральных и субавроральных широтах значительные амплитуды ГИТ наблюдаются преи-

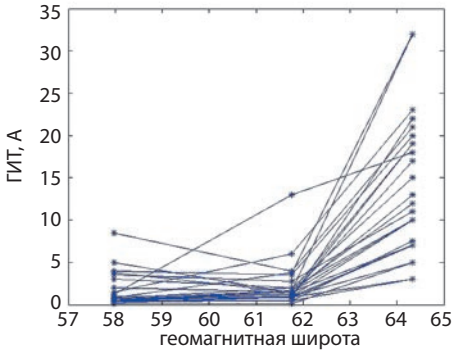


рис. 7. Распределение максимальных часовых значений ГИТ на сети регистраторов для активных периодов 2012 г.

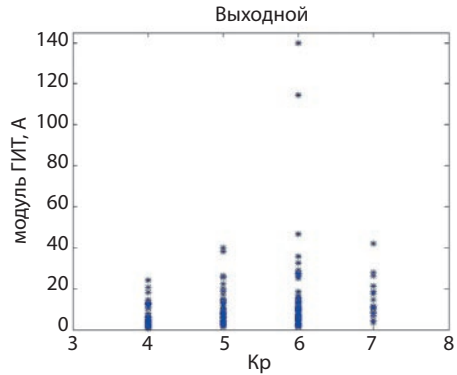


рис. 8. Максимальные значения ГИТ на подстанции Выходной при различных уровнях геомагнитной возмущенности.

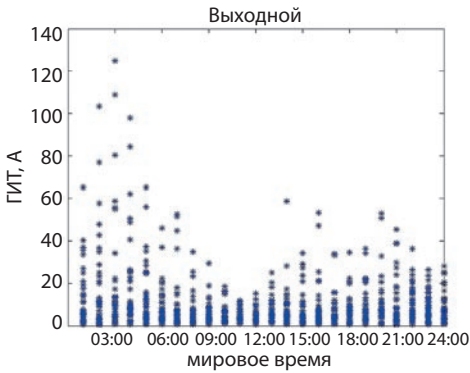


рис. 9. Максимальные значения амплитуды ГИТ за час по станции Выходной в различные моменты времени для 2013 г.

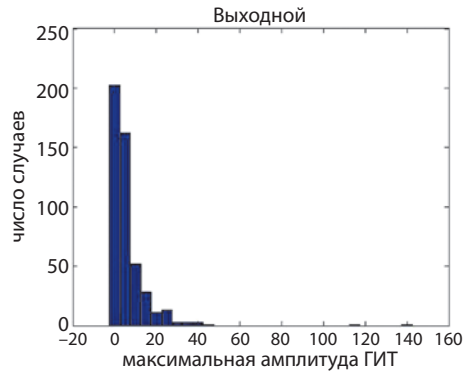


рис. 10. Частотность появления максимальных значений ГИТ по станции Выходной.

мощественно в вечернем и ночном секторе в периоды суббуревой активности, и ночном–утреннем секторе в связи с волновыми возмущениями в магнитосфере, то есть во время значительных вариаций геомагнитного поля на земной поверхности [Viljanen, 1997, Viljanen et al., 2001].

Частотность появления сигналов ГИТ различной амплитуды представлена на рис. 10.

В таблице 2 представлены наибольшие значения амплитуды ГИТ для северной (Выходной) и наиболее южной станции (Кондопога), ранжированные по величине.

Анализ приведенных распределений (рис. 7, 8, 9) и таблицы позволяет заметить, что на фоне относительно гладких закономерностей наблюдаются значительные «выбросы» амплитуды, назовем их экстремальными событиями. С точки зрения обеспечения стабильной работы энергораспределительной системы именно эти, экстремальные, события могут оказаться наиболее опасными.

таблица 2. Ранжированные максимальные значения ГИТ

Выходной			Кондопога		
порядок	дата	максимум тока [А]	порядок	дата	максимум тока [А]
1	29.06.2013	>125	1	25.10.2011	32,45
2	12.06.2012	57,89	2	29.06.2013	27,57
3	17.03.2015	56,70	3	09.10.2012	26,15
4	01.06.2013	42,22	4	08.10.2012	11,02
5	25.04.2012	40,55	5	03.09.2012	10,66
6	14.11.2012	37,70	6	17.03.2013	10,45
7	09.03.2012	35,77	7	15.03.2012	10,01
8	03.09.2012	35,65	8	15.07.2012	8,13
9	16.07.2012	32,92	9	16.07.2012	6,59
10	23.02.2013	31,97	10	14.10.2012	5,4

С учетом опубликованной информации, следует ожидать, что экстремальные события могут определяться исключительно сильными, но и редкими геомагнитными возмущениями, плохо поддающимися прогнозу. Из собственного опыта отметим, что реакция каждой локальной энергосистемы зависит и от положения по отношению к центру активности. Кроме того, при реальной эксплуатации энергосетей конфигурация системы, а значит, и ее отклик на геомагнитные возмущения, может меняться. Примером такого экстремального события может служить буря 29 июня 2013 г. Оригинальная информация с сайта eurisgic.org приведена на рис. 5. Особенность данного события в том, что достаточно сильное возмущение в авроральной зоне в период с 01 до 03 UT при минимальном значении $Dst = -100$ нТ и $AL = -500$ нТ развилось на фоне длительного «конвективного» возмущения с продолжительным периодом (~ 9 часов) отрицательного значения компоненты $B_z \approx -10$ нТ межпланетного магнитного поля. В период примерно с 19 часов мирового времени 28.06.2013 до 07 часов 29.06.2013 развивалось довольно сложное возмущение волнового характера, с явно выраженным активным периодом в авроральной зоне с 01 до 03 часов мирового времени. На станции Выходной были зарегистрированы экстремально большие значения ГИТ (более 120 А). По данным риометров, событие сопровождалось значительными высыпаниями энергичных электронов, авроральный электроджет, по-видимому, имел резкую экваториальную границу. Резкий градиент возник и в геоэлектрическом поле на экваториальной границе зоны высыпания, что можно определить, воспользовавшись известной связью между скоростью изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля и индуцированным электрическим полем [Viljanen et al., 2001] рис. 11, 12. Положение зоны высыпаний авроральных электронов (зеленая область на рис. 12) нами определялось по оригинальной модели высыпаний энергичных частиц [Vogobjev et al., 2013]. И именно в этом событии на подстанции Выходной к магистральной сети был подключен только один автотрансформатор. Таким образом, совокупность факторов, вероятнее всего, обеспечила развитие экстремально большого тока, примерно в два раза превышающего типичное значение для данной станции при таком уровне активности, в том числе для сильнейшей за цикл бури 17–19 марта 2015 г.

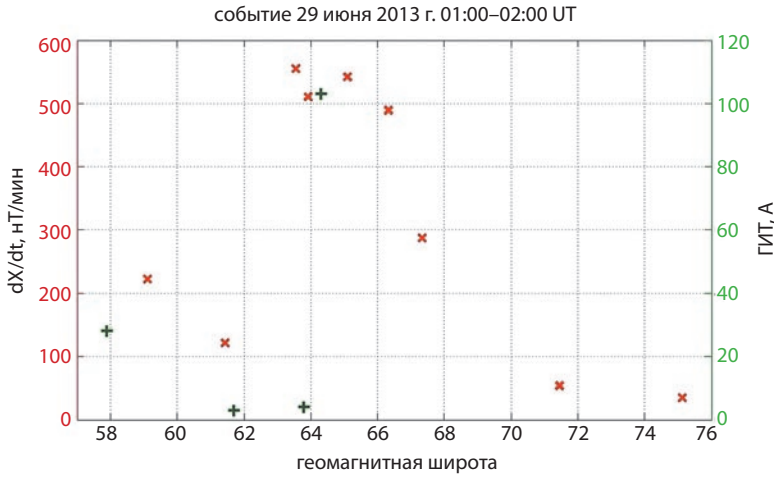


рис. 11. Распределение производной северо-южной компоненты геомагнитного поля и тока ГИТ по широте для экстремального события 29.06.2013.

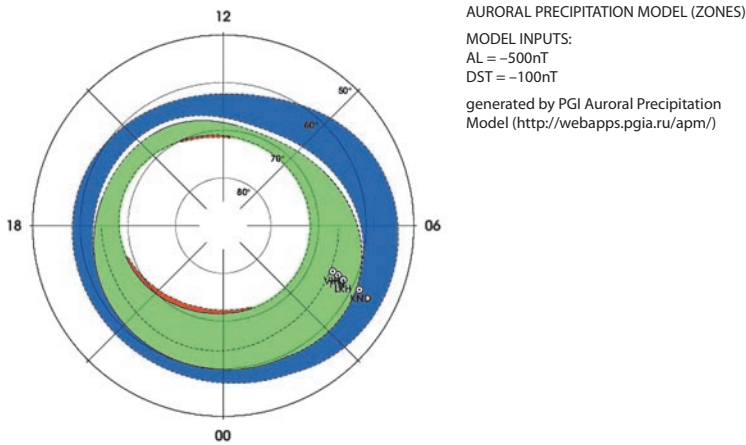


рис. 12. Положение станций относительно зон выпадений авроральных частиц.

В конце обсуждения отметим, что за время проведения наблюдений при магнитосферных возмущениях нами обнаружены неоднократные случаи возбуждения гармоник промышленной частоты в нейтральных высоковольтных автотрансформаторов магистральной линии. Эти факты свидетельствуют о реально существующих процессах перегрузки трансформаторов, смещении их рабочей точки и реальности возникновения угрозы стабильной работе энергосистемы. Ввиду недостатка места ограничимся ссылками на уже опубликованные результаты [Селиванов и др., 2012; Ефимов и др., 2013].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами создана оригинальная система непрерывной регистрации ГИТ в реально работающей энергосистеме, расположенной в особой,

Арктической зоне, там, где любая промышленная аппаратура подвержена не только влиянию жесткого климата, но и периодическим атакам космической погоды. Система сбора, передачи, хранения и организации доступа к уникальной информации о развитии ГИТ не имеет аналогов в России. Мы полагаем, что результаты нашей работы могут найти применение в части

- сравнения результатов измерений с модельными расчетами ГИТ в сетях с целью верификации модели, как это было сделано в нашем эксперименте;
- применения разработанной методики для контроля качества электроэнергии на подстанциях, обслуживающих системы автоматики железных дорог;
- оценки результатов возможного воздействия магнитосферных возмущений на существующие энергосистемы и иные технологические объекты.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании, строительстве и эксплуатации сложных энергетических систем в арктической зоне, а также при разработке соответствующих государственных стандартов по защите технологических систем от пагубного воздействия факторов космической погоды.

Реализованный нами подход регистрации ГИТ, а также полученные нами результаты могут быть использованы при создании федеральной службы прогноза и контроля за развитием космической погоды и оперативной оценки уровня опасности для соответствующих технологических систем.

Как было показано в работе [Pulkkinen et al., 2012], при развитии чрезвычайно сильных магнитосферных возмущений зона повышенной опасности от воздействия индуктированных геоэлектрических полей сдвигается от авроральных широт к экватору и занимает интервал геомагнитных широт от 40° до 60° . В указанный интервал широт на территории России попадет значительная часть промышленных объектов, в том числе практически все объекты энергетики, железные дороги, газо- и нефтепроводы.

Если к тому же принять во внимание наблюдаемое смещение геомагнитного полюса [Осипов и др., 2010; Лазутин, 2012], то становится очевидным, что для России изучение возможного воздействия космической погоды на технологические системы, в том числе на системы энергетики, исключительно актуально не только для авроральных, но и для средних широт.

ЛИТЕРАТУРА

- [Баранник и др., 2012] Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катъкалов Ю.В., Колобов Б.Б., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуктированных токов в нейтральных силовых втотрансформаторов. ПТЭ, 2012. №1. С.118-123.
- [Ефимов и др., 2013] Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова. Новости электротехники, № 2 (80), 2013.
- [Лазутин, 2012] Лазутин Л.Л. Воздействие магнитных бурь на техносферу и эффект смещения северного магнитного полюса // Троицкий вариант. – 2012. – Т. 14, № 108.

- [Осипов и др., 2010] *Осипов В.Н., Махутов Н.А., Данилин А.Н., Любарский Д.Р., Скопинцев В.А., Мисриханов М.Ш., Сахаров Я.А., Цыганков С.С., Цыганков С.С. (II)* Безопасность электрических сетей России от гелиогеомагнитной опасности – необходимый элемент обеспечения энергетической и геоэкологической безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, Сборник ВИНТИ, №5. М.: 2010. С. 42-53.
- [Сахаров и др., 2009] *Сахаров Я.А., Кудряшова Н.В., Данилин А.Н., Кокин С.М., Шабалин А.Н., Пирьола Р.* Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики // Вестник МИИТа, 2009. Вып. 21. С. 107-111.
- [Селиванов и др., 2012] *Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А.* Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтральных автотрансформаторов // Труды КНЦ РАН. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012. №1. Энергетика. Выпуск 4. – С. 60-68.
- [Boteler et al., 1998] *Boteler D., Pirjola R., Nevanlinna H.* The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth surface. *Adv. Space Res.* 1998. 22. P. 17-27.
- [Elovaara et al., 1992] *Elovaara J., Lindblad P., Viljanen A., Mäkinen T., Pirjola R., Larsson S., Kielén B.* “Geomagnetically induced currents in the Nordic power system and their effects on equipment, control, protection and operation”. CIGRÉ Paper № 36–301, CIGRÉ General Session 1992, Paris, France, August 31 – September 5, 1992, – 10 p.
- [Eroshenko et al., 2010] *Eroshenko E.A., Belov A.V., Boteler D., Gaidash S.P., Lobkov S.L., Pirjola R., Trichtchenko L.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // *Advances in Space Research*, 2010. 46, P. 1102-1110.
- [Mäkinen, 1993] *Mäkinen T.* Geomagnetically induced currents in the Finnish power transmission system // Finnish Meteorological Institute, Geophysical Publications, Helsinki, Finland. 1993. № 32. – 101 p.
- [Pulkkinen et al., 2012] *Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., Beggan C. and Thomson A.W.P.* Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios // *Space Weather*, 2012. 10, S04003. DOI: 10.1029/2011SW000750.
- [Sakharov et al., 2007] *Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M.* Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula // Proc of 7th International symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. St-Petersburg, June 26–29, 2007, – St-Petersburg, 2007. P. 291-293. IEEE Cat.N. 07EX1804C; ISBN: 1-4244-1270-6
- [Sakharov et al., 2010] *Sakharov Ya., Trichtchenko L., Boteler D.H.* Effects of Geomagnetic Disturbances on Pipelines // in Proc. The European corrosion congress EUROCORR 2010, 13–17 September, Moscow, Russia, 2010.
- [Trichtchenko, Danskin, 2009] *Trichtchenko L., Danskin D.* Addressing the needs of pipeline industry // Proc. of 8th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St-Ptb, June 16–19, 2009. – P. 209-211.
- [Viljanen and Pirjola, 1994] *Viljanen A. and Pirjola R.* Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system, A geophysical review // *Surv. Geophys.* 1994. Vol. 15, № 4, P. 383-408.
- [Viljanen, 1997] *Viljanen A.* The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks, *GRL*. 1997. V. 24. P. 631-634.
- [Viljanen et al., 2012] *Viljanen A., Pirjola R., Honkonen I., Thomson A., Clarke E., Magnus W., Wintoft P., Wesztergom V., Pracser E., Sakharov Ya., Katkalov Yu., Pulkkinen A.* EURISGIC: European Risk from Geomagnetically Induced Currents // *Let's Embrace Space*, European Commission. 2012. V. II. P. 482-485.

- [Viljanen et al., 2001] *Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpaa K., Pulkkinen A.* Time derivative of the geomagnetic field as an activity indicator // *Ann. Geophys.* 2001. №19. P. 1107-1118.
- [Vorobjev et al., 2013] *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y.* Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *J. Atm. S-Terr. Phys.*, 2013. V. 102. Issue (September). P. 157-171.

GIC REGISTRATION IN THE REGIONAL POWER GRID

Ya. Sakharov¹, J. Katkalov², V. Selivanov³, A. Viljanen⁴

¹ Polar Geophysical Institute (PGI), Russia

² Swedish Institute of Space Physics (IRF), Sweden

³ Kola Science Center (KSC RAS), Russia

⁴ Finnish Meteorological Institute (FMI), Finland

In The project EURISGIC (European Risk from Geomagnetically Induced Currents) we organized a continuous recording geomagnetically induced currents (GIC) at five substations of power system in North-West of Russia. The paper presents the results of GIC registration in 2011–2015, the methods of registration, collection and presentation of information, the distribution of the maximum current value of the latitude, the level of magnetic activity and the local time, as well as cases of excitation power frequency harmonics in autotransformers trunk during magnetospheric disturbances .

This work was supported by the EU under the FP7 / 2007–2013 program, a grant n260330.

Keywords: space weather, magnetospheric disturbances, geomagnetically induced currents.

Sakharov Yaroslav Alexeevich – head of Laboratory of High-Latitude Geophysical Monitoring, PGI, PhD, sakharov@pgia.ru.

Katkalov Juri – ingineer, IRF, juri@katkalov.com.

Selivanov Vasilii Nikolaevich — deputy director, Center of Physical and Technical Problems of the Northern energetics, KSC RAS, PhD, selivanov@ien.kolasc.net.ru.

Viljanen Ari – researcher, FMI, ari.viljanen@fmi.fi.

ЦЕНТР ОПЕРАТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НИИЯФ МГУ

В.В. Калегает, С.Ю. Бобровников, Н.В. Кузнецов, И.Н. Мягкова, Ю.С. Шугай

НИИ Ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Среди факторов космической погоды одним из наиболее опасных является радиация. Радиация в космосе обусловлена наличием нейтральных и заряженных частиц различной природы и создает проблемы для «живучести» не только самих космических аппаратов, но и человека. Поэтому учет радиационных условий необходим для осуществления практической деятельности в космосе. Центр оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ осуществляет анализ и прогнозирование радиационных условий в околоземном космическом пространстве (<http://swx.sinp.msu.ru/>). В режиме реального времени, по данным спутниковых и наземных измерений информационной системой автоматически определяются основные характеристики воздействия солнечной и геомагнитной активности на радиационное окружение Земли. Основными компонентами системы радиационного космического мониторинга являются оперативные данные космических экспериментов по измерению потоков заряженных частиц в интервале энергий от сотен кэВ до сотен МэВ, данные наблюдений за Солнцем и параметрами солнечного ветра и модели космической среды.

Ключевые слова: космическая радиация, околоземное космическое пространство, базы данных.

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационные условия являются одним из главных факторов космического пространства, которые должны приниматься во внимание при анализе космической погоды. Энергичные заряженные частицы, формирующие радиационные условия в околоземном пространстве, могут привести к повреждению и выходу из строя электроники, установленной на космических аппаратах (КА). Они представляют опасность для здоровья космонавтов, а в отдельных случаях (если солнечные протоны приходят к Земле на главной фазе магнитной бури, когда граница их проникновения в магнитосферу сдвигается на более низкие широты), пилотов и пассажиров авиалайнеров во время трансполярных перелетов [1]. Потоки рентгеновского излучения, образовавшиеся в солнечных вспышках, могут стать причиной нарушения коротковолновой связи в высокоширотных районах, а также приводить к сбоям в навигационных системах. По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры КА обусловлено неблагоприятным воздействием фак-

Калегает Владимир Владимирович – зав. лаб., НИИЯФ МГУ, д.ф.м.н., klg@dec1.sinp.msu.ru.

Бобровников Сергей Юрьевич – с.н.с., НИИЯФ МГУ, к.ф.м.н., bobrovnikov@msu.ru.

Кузнецов Николай Викторович – с.н.с., НИИЯФ МГУ, к.ф.м.н., nvk@srd.sinp.msu.ru.

Мягкова Ирина Николаевна – с.н.с., НИИЯФ МГУ, к.ф.м.н., irina@srd.sinp.msu.ru.

Шугай Юлия Сергеевна – с.н.с., НИИЯФ МГУ, к.ф.м.н., jshugai@srd.sinp.msu.ru.

торов космического пространства [2–5]. Заряженные частицы вызывают деградацию полупроводниковых материалов, сбои в микросхемах бортовых систем, «внутреннюю электризацию» элементов КА. При этом может происходить как постепенное ухудшение свойств материалов и характеристик бортовых систем с последующим отказом по истечении некоторого периода эксплуатации, так и возникновение внезапных отказов в работе бортовой аппаратуры. Результатом может стать, например, постепенное снижение эффективности солнечных батарей КА в результате накопления поглощенной дозы космической радиации, либо сбои в микросхемах с высокой степенью интеграции под действием тяжелых заряженных частиц¹.

Оперативный мониторинг радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП), анализ и прогнозирование радиационного состояния позволяют предупредить опасные последствия, вызываемые изменениями в радиационной обстановке. При этом следует учитывать неразрывную связь процессов, происходящих в ОКП с солнечной и геомагнитной активностью.

Радиационные условия в околоземном пространстве формируются под воздействием солнечной и геомагнитной активности. Солнечные вспышки приводят к образованию и ускорению солнечных космических лучей (СКЛ), а вариации параметров солнечного ветра, поток которого деформирует магнитосферу и приводит к изменениям магнитосферного магнитного поля, определяют динамику потоков частиц внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). Поэтому, наряду с мониторингом величин потоков энергичных заряженных частиц, необходимо осуществлять контроль состояния Солнца на основе мультиспектральных наблюдений, в том числе в рентгеновском и гамма диапазонах. Также, крайне важно осуществлять контроль за параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в точке либрации L1, где возможно постоянное присутствие космического аппарата с мониторинговой аппаратурой [6].

В связи с практической невозможностью осуществлять мониторинговые измерения в большей части космического пространства встает вопрос об обобщении имеющейся информации на орбиты функционирования космической техники, не обладающей собственными детекторами заряженных частиц. С этой целью в состав системы мониторинга необходимо включать операционные модели космической среды. Другая важная функция моделей – прогнозирование факторов космической среды, позволяющее прогнозировать радиационные условия как на заданных орбитах, так и во всем околоземном пространстве в целом. Для повышения надежности прогноза радиационных условий необходимо располагать всей имеющейся информацией о солнечных, геомагнитных и гелиосферных процессах. Тесная взаимосвязь процессов на Солнце, в гелиосфере и в магнитосфере Земли делает критически важной одновременную обработку данных многих космических аппаратов. Использование современных аппаратно-программных средств работы с информацией необходимо для эффективной работы современных систем космического мониторинга.

¹ URL: <https://data.noaa.gov/dataset/spacecraft-anomalies>

Настоящая статья описывает систему оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ, направленную на предупреждение об опасных проявлениях космической погоды, связанных с космической радиацией. Будет представлена схема формирования потоков информации в системе прогнозирования радиационного состояния ОКП и описаны факторы космического пространства, изменения которых могут быть спрогнозированы имеющимися моделями на основе результатов измерений регистрирующей аппаратуры космических аппаратов.

2. ФАКТОРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СОСТОЯНИЕ ОКП

Радиационное состояние ОКП формируется под воздействием следующих физических факторов:

- энергичные заряженные частицы солнечных космических лучей (протоны, электроны, ядра);
- энергичные заряженные частицы радиационных поясов Земли (протоны и электроны);
- галактические космические лучи.

Для правильной оценки радиационных условий следует учитывать влияние геомагнитной активности на распространение, ускорение и рассеяние заряженных частиц в магнитосфере. Также, необходимо принимать во внимание характеристики солнечной активности: состояние солнечной короны, нейтральное излучение солнечных вспышек, в ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма диапазонах. Прямые измерения потоков энергичных частиц, наблюдения за солнечной и геомагнитной активностью являются основными элементами системы радиационного мониторинга.

Наибольший эффект на бортовую аппаратуру КА оказывают потоки СКЛ, вызывающие сбои и деградацию микросхем, а также вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ), вызывающие внутреннюю электризацию элементов КА. Внутренний пояс Земли, в котором присутствуют и протоны, и электроны, является относительно стабильным образованием, и дозы, получаемые в нем КА, зависят только от орбиты данного КА.

Максимальный вклад в суммарную радиационную дозу вносят протоны СКЛ с энергией от 20 до 500 МэВ, поэтому регистрация потоков этих частиц представляет максимальный интерес. Необходимо учитывать, что если возрастание потоков СКЛ происходит во время магнитной бури, то проникновения частиц СКЛ в магнитосферу Земли происходит на более низкие широты вследствие изменения структуры магнитосферного магнитного поля.

Во время геомагнитных бурь потоки релятивистских электронов ВРПЗ с энергиями выше 0,5 МэВ резко падают на главной фазе, а на фазе восстановления примерно в 50 % случаев возрастают на несколько порядков. Геомагнитные бури могут происходить в результате прихода к Земле как корональных выбросов массы (КВМ), так и высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ), источником которых являются низкоширотные корональные дыры (КД) на диске

Солнца. КВМ, как правило, связаны со вспышками на Солнце, и, следовательно, вносят основной вклад в вариации ВРПЗ во время максимума солнечной активности. Высокоскоростные потоки СВ, связанные с КД, существуют на всех фазах солнечного цикла и также могут оказывать значительное влияние на радиационную обстановку в ОКП, особенно в минимумах солнечной активности (СА). Для прогнозирования вариаций потоков электронов ВРПЗ используются данные о параметрах ММП и СВ, также важно учитывать предыдущее состояние самого ВРПЗ.

Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение солнечных вспышек, хотя и являются важными факторами космической погоды, оказывающими влияние на состояние ионосферы Земли, в рамках радиационного воздействия на КА с поллярными орбитами серьезной угрозы не представляют. Что касается ГКЛ, то их вариации носят более долговременный характер, и могут быть рассчитаны по существующим моделям.

Таким образом, можно составить список параметров ОКП необходимых для описания радиационного состояния ОКП:

- потоки протонов СКЛ с энергией от 20 до 500 МэВ;
- потоки релятивистских электронов ВРПЗ с энергией выше 0,5 МэВ.

Для правильной интерпретации данных измерений потоков заряженных частиц, для прогнозирования и обобщения данных измерений на все ОКП с помощью моделей, требуется наблюдение за солнечной и геомагнитной активностью, за параметрами солнечного ветра. Информационная система НИИЯФ МГУ осуществляет автоматизированный сбор этих данных в режиме реального времени.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ДАННЫХ ДЛЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НИИЯФ МГУ

Все используемые для мониторинга радиационной обстановки данные, представляющие собою длинные непрерывные временные ряды, берутся с уникальных экспериментов на КА. Наряду с мониторингом величин потоков энергичных заряженных частиц (спутники ACE, GOES, Электро Л1, Л2, Метеор М1, М2), осуществляется контроль за состоянием Солнца на основе мультиспектральных наблюдений, в том числе в рентгеновском диапазоне (спутники SDO, GOES). Контроль за параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля осуществляется на основе данных измерений спутника ACE, расположенного в точке либрации L1, где возможно постоянное присутствие космического аппарата с мониторинговой аппаратурой. Дополнительно в список параметров системы радиационного контроля включены данные по солнечной и геомагнитной активности: число Вольфа, геомагнитные индексы Dst и Kp.

Все необходимые исходные данные загружаются со специализированных порталов в сети интернет. На рисунке 1 показана схема подготовки данных для мониторинга и прогнозирования радиационной обстановки. Ключевыми особенностями реализованной методики являются:

- защита от сбоев при передаче данных, осуществляющая повторные попытки загрузки данных в случае, например, обрыва связи;
- проверка изменений в ранее загруженных данных с целью заполнения возможных пробелов;

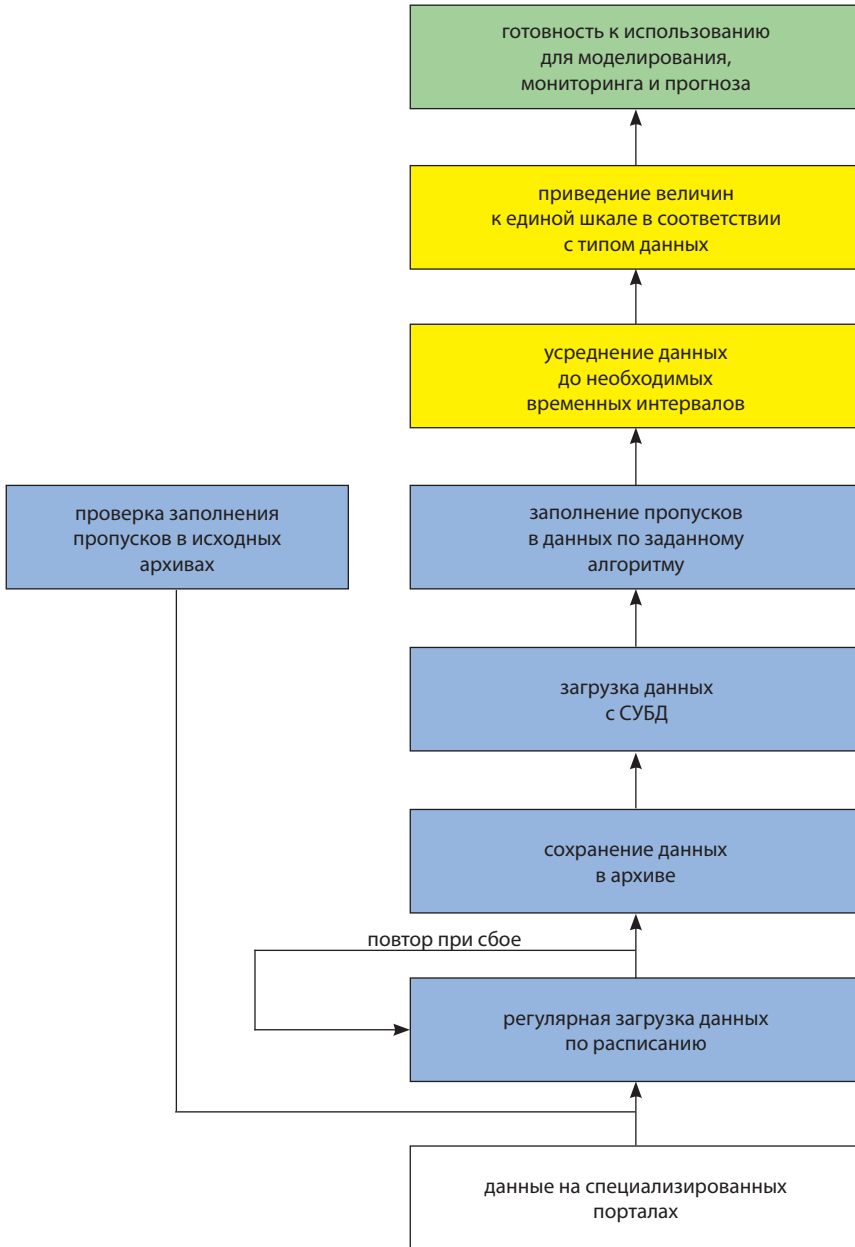


рис. 1. Схема подготовки данных, для решения задач анализа и прогнозирования радиационного состояния ОКП

- усреднение данных по нескольким временным интервалам, требуемым различными моделями прогнозирования;
- приведение схожих по физическому смыслу данных различных спутниковых экспериментов к единой шкале для обеспечения взаимозаменяемости и удобства визуализации.

Особое значение имеют данные измерений российских аппаратов серий «МЕТЕОР-М» и «ЭЛЕКТРО-Л» с установленной на борту аппаратурой НИИЯФ для регистрации потоков электронов и протонов с энергией от 50 эВ до сотен МэВ. Поступающая информация оперативно обрабатывается в Центре данных космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ и используется для текущего анализа радиационных условий в околоземном космическом пространстве. Интернет-портал Центра¹ обеспечивает доступ к данным измерений спутников в течение нескольких минут после поступления данных. Использование оригинальных отечественных данных совместно с информацией, получаемой с зарубежных аппаратов, позволяет осуществлять более качественный анализ радиационной обстановки.

В состав мониторинговой информации, используемой для анализа радиационной обстановки, входят следующие данные:

1. со спутника SDO: изображения Солнца в диапазонах 131 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 304 Å, а также магнитограммы;
2. со спутника ACE:
 - а. плотность и скорость плазмы солнечного ветра (СВ) (частиц в см³ и км/с, соответственно);
 - б. модуль вектора и значения трех компонент межпланетного магнитного поля (ММП) (нТ);
 - в. потоки протонов в диапазоне энергий 0,795–1,9 МэВ;
 - д. потоки электронов в диапазоне энергий 38–315 кэВ;
3. со спутника GOES:
 - а. потоки мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 0,5–8 Å;
 - б. дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий 4–200 МэВ;
 - в. интегральные потоки электронов в диапазоне энергий от >0,8 до 2 МэВ;
4. со спутников Электро-Л1 и Л2:
 - а. дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий 13,5–320 МэВ;
 - б. интегральные потоки электронов в диапазоне энергий >1.3 МэВ;
5. со спутников Метеор-М1 и М2:
 - а. дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий от 1 до 260 МэВ;
 - б. интегральные потоки электронов в диапазоне энергий от >100 кэВ до >4 МэВ;
6. Геомагнитные индексы Dst, AL и Kp.

¹ URL: <http://smdc.sinp.msu.ru>

Поступающие в ЦДОКМ данные загружаются в базу данных Oracle, после чего запускаются модели и приложения, позволяющие рассчитать прогнозные значения необходимых величин или оценить не измеряемые прямо ключевые параметры магнитосферы, как-то, давление солнечного ветра и/или расстояние до подсолнечной точки магнитосферы. Вновь полученные данные моделирования также заносятся в базу данных. Выполняется усреднение данных по стандартным временным интервалам: 1 мин, 5 мин, 1 час.

Для каждого временного разрешения формируются три потока данных: данные измерений; прогнозируемые значения данных измерений, необходимые для работы приложений; прогнозируемые значения факторов космической погоды, прямо не измеряемые космическими аппаратами, позволяющие эффективно осуществлять автоматический онлайн анализ, выполняемый одновременно для характеристик ММП и СВ, геомагнитных индексов, потоков заряженных частиц малых и больших энергий, измеряемых на аппаратах в разных областях ОКП. Такой подход позволяет проследить всю цепочку геофизических возмуще-

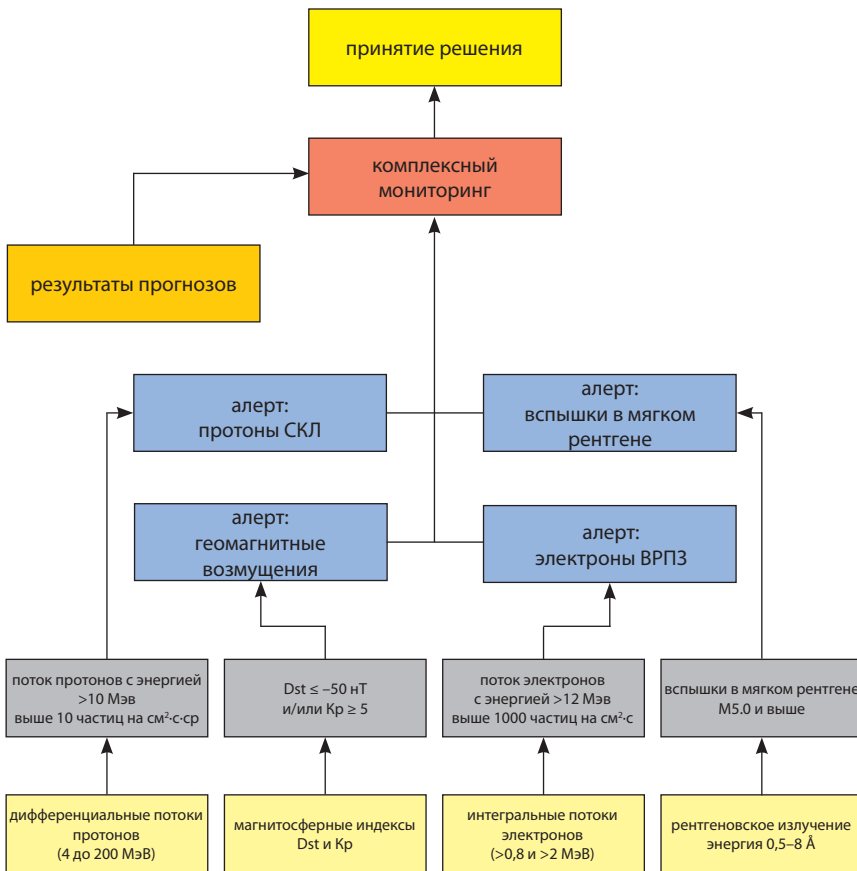


рис. 2. Схема функционирования системы предупреждений.

ний «Солнце – гелиосфера – солнечный ветер – магнитосфера Земли», в конечном итоге влияющих на радиационное состояние ОКП, создавая условия, критичные для функционирования КА.

4. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ

Хранение информации в базе данных под управлением высокопроизводительной СУБД Oracle дает возможность осуществлять интеллектуальную обработку и максимально быстрый анализ поступающей информации. Рисунок 2 описывает систему обработки данных, получаемых с действующих космических экспериментов. Ниже приведены пороговые значения для ключевых факторов космической среды, соответствующие величинам, используемым в Центре космической погоды НОАА¹, превышение которых свидетельствует о развитии потенциально опасных процессов и явлений в ОКП:

- поток протонов СКЛ с энергиями >10 МэВ превышает 10 частиц/см²·с·ср;
- поток электронов ВРПЗ с энергиями >2 МэВ превышает 1000 частиц/см²·с·ср;
- вспышечная активность превышает уровень M5.0;
- геомагнитная активность характеризуется значениями $Dst < -50$ нТл и/или $Kp > 5$.

Система предупреждений осуществляет постоянное сопоставление данных измерений с конкретными пороговыми значениями и формирует бюллетени с сообщением об изменениях радиационной и геомагнитной обстановки в ОКП. Текущее состояние радиационной среды в ОКП представлено на бюллетене², который можно загрузить с сайта ЦДОКМ НИИЯФ МГУ.

5. СИСТЕМА ПРОГНОЗОВ

Данные прямых измерений являются основой для оценки радиационного состояния ОКП. Но не все данные можно обобщить на произвольные области космического пространства. Потоки заряженных частиц на геостационарной орбите не соответствуют потокам, которые измеряются на низких орбитах. Это связано как с пространственной структурой магнитного поля, так и с временными вариациями, как поля, так и потоков частиц (например, частиц СКЛ). Кроме этого, для принятия управляющих решений операторам, осуществляющим эксплуатацию КА требуется не только располагать информацией о текущем состоянии космического пространства, но и иметь достоверный прогноз на основании моделей факторов космической среды. Система формирования прогнозов определяется потребностью пользователей системы, в принятии решений относительно текущих и планируемых задач космических миссий.

В дополнение к системе предупреждений (алертов), системой радиационного мониторинга ЦДОКМ предусмотрено прогнозирование факторов космиче-

¹ URL: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

² URL: <http://swx.sinp.msu.ru/bulletin.html>

ской погоды, базирующихся на следующих инженерных моделях, разработанных в НИИЯФ МГУ:

- моделирование геомагнитных индексов;
- моделирование положения внешней границы внешнего радиационного пояса Земли;
- моделирование суточных флюенсов релятивистских электронов на геостационарной орбите;
- моделирование потоков и доз на низких орбитах;
- моделирование параметров солнечного ветра.

Модели используют данные измерений, хранящиеся в базе данных, таким образом система прогнозирования параметров космической среды допускает дальнейшее развитие и совершенствование. Интернет-портал¹ обеспечивает доступ к данным моделирования. На рисунке 3 приведен результат прогнозирования скорости солнечного ветра по модели [7] на основе данных наблюдений за солнечной короной спутником SDO в спектральном диапазоне с центром на длине волны 19,3 нм.

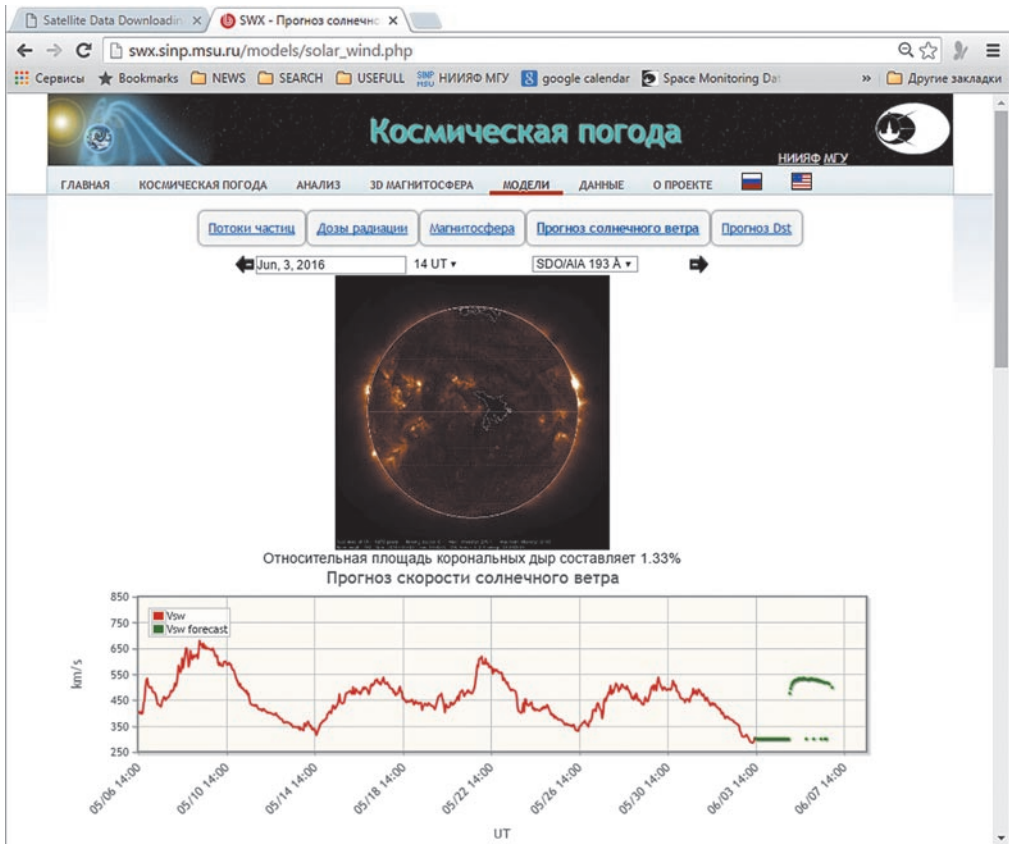


рис. 3. Прогноз скорости солнечного ветра по данным наблюдений за солнечной короной.

¹ URL: <http://swx.sinp.msu.ru>

6. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНЫХ ФЛУЕНСОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В ЦДОКМ реализована методика прогнозирования суточных флуенсов релятивистских электронов (с энергией выше 2 МэВ) внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите при помощи искусственных нейронных сетей (ИНС).

При прогнозировании суточных флуенсов электронов на геостационарной орбите используются потоки с энергией $> 2\text{МэВ}$, измеряемые на КА серии GOES. Принятие решений потребителем системы выполняется на основании совместного анализа результатов прогноза и алерта – «электроны ВРПЗ».

Для осуществления прогнозирования суточных флуенсов РЭ ВРПЗ используются следующие входные данные:

1. параметры солнечного ветра (СВ) в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем:
 - а. максимальные суточные и среднесуточные значения скорости СВ v (км/с);
 - б. максимальные суточные значения плотности протонов в СВ n_p (см^{-3});
 - в. максимальные суточные значения температуры протонов в СВ T (К);
2. компоненты вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем (нТл):
 - а. интегральные суточные значения V_x (x-компоненты ММП в системе GSM);
 - б. интегральные суточные значения V_y (y-компоненты ММП в системе GSM);
 - в. интегральные суточные значения V_z (z-компоненты ММП в системе GSM);
 - г. интегральные суточные значения V_{magn} (модуля вектора ММП)
3. геомагнитные индексы:
 - а. минимальные суточные значения экваториального геомагнитного индекса Dst (нТл);
 - б. максимальные и интегральные суточные значения глобального геомагнитного индекса K_p (безразмерный);
4. потоки релятивистских электронов на геостационарной орбите ($1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$): Интегральные суточные значения (флуенсы) потоков электронов с энергиями больше 2 МэВ.

В случае, если требуемые значения с необходимым шагом по времени недоступны, они вычисляются в реальном времени на основе среднечасовых значений соответствующих параметров.

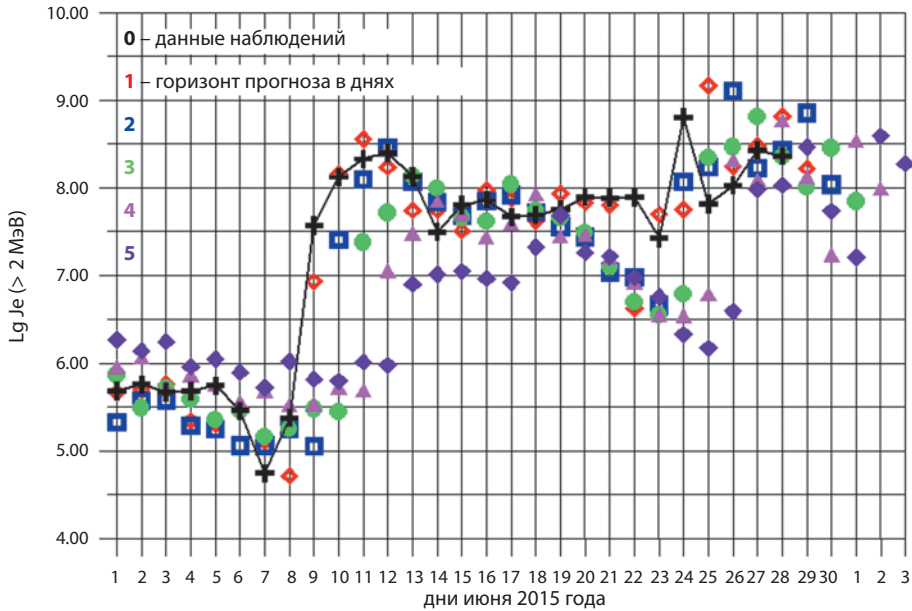


рис. 4. Прогноз суточных флуенсов от 1 до 5 суток с 1 июня по 3 июля 2015 г.

Пример прогноза суточных флуенсов с горизонтом прогноза от 1 до 5 суток (за период с 1 июня по 3 июля 2015 года) приведен на Рисунке 4. Видно, что качество прогноза является удовлетворительным при горизонте прогноза не более 3 часов.

Для увеличения горизонта прогноза как один из вариантов может быть рассмотрено использование прогнозирования скорости СВ на основании данных о параметрах корональных дыр, получаемых по изображениям Солнца.

7. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ НА ОРБИТАХ ПОЛЯРНЫХ НИЗКОЫСОТНЫХ СПУТНИКОВ

В ЦДОКМ реализована методика контроля текущих радиационных нагрузок, которые возникают в бортовой аппаратуре КА от потоков СКЛ. Это достигается путем пересчета потоков частиц СКЛ, регистрируемых на геостационарных спутниках, в значения мощности поглощенной дозы и частоты одиночных сбоев, которые ожидаются на заданной орбите КА.

Разработанная методика обеспечивает расчет значений мощности поглощенной дозы и частоты одиночных сбоев бортовой аппаратуры КА при появлении во время полета КА потоков СКЛ. В НИИЯФ МГУ разработана расчетная модель оценки потоков солнечных энергичных частиц, предусматривающая проникновение частиц на трассах полетов КА с учетом геомаг-

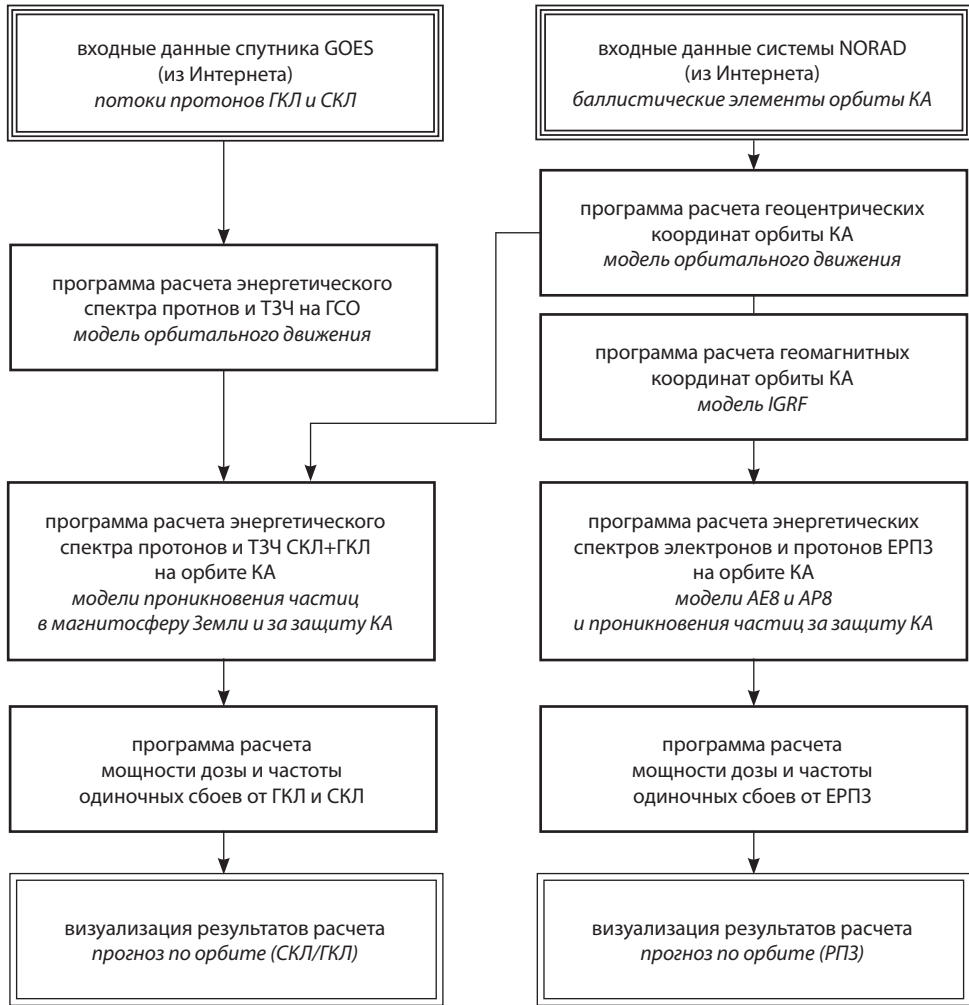


рис. 4. Блок-схема взаимодействия программ расчета радиационных нагрузок на КА при воздействии заряженных частиц СКЛ.

нитного обрезания в зависимости от уровня геомагнитной активности и от конкретных мониторинговых измерений потоков частиц на геостационарной орбите или в межпланетном пространстве. Этот расчет проводится для заданной орбиты КА, учитывая изменение координат КА $r(t)$ в зависимости от времени полета t . Координаты КА рассчитываются по баллистическим данным информационной системы NORAD. Полная процедура расчета включает несколько этапов [8]:

1. используя экспериментальные данные геостационарного спутника GOES (или ЭЛЕКТРО-Л) в текущий момент времени t_0 (время последнего показания), определяют энергетические спектры потока протонов СКЛ в межпланетном пространстве $F_{t_0}^{(GCO)}(E_p)$;

2. используя энергетические спектры потока протонов СКЛ $F_{t_0}^{(SCO)}(E_p)$ и модель состава тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) СКЛ, находят энергетические спектры потока ТЗЧ СКЛ $F_{t_0}^{(SCO)}(E_z)$;
3. используя модель проникновения заряженных частиц в магнитосферу Земли, рассчитывают энергетические спектры потока протонов $F_t^{(opb)}(E_p)$ и ТЗЧ $F_t^{(opb)}(E_z)$ на орбите КА в моменты времени $t > t_0$;
4. используя данные о потерях энергии заряженных частиц в веществе защиты пересчитывают энергетические спектры потоков частиц на орбите $F_t^{(opb)}(E_p)$ и ТЗЧ $F_t^{(opb)}(E_z)$ в энергетические спектры потока протонов $F_{t,x}^{(opb)}(E_p)$ и в спектры линейной передачи энергии (ЛПЭ) от ТЗЧ $F_t^{(opb)}$ (ЛПЭ) для выбранной толщины защиты x ;
5. используя найденные спектры $F_{t,x}^{(opb)}(E_p)$ и $F_t^{(opb)}$ (ЛПЭ) рассчитывают изменение мощности поглощенной дозы и частоту одиночных сбоев (в микросхеме с заданными параметрами чувствительности) в зависимости от времени полета КА t .

Указанная процедура реализована на основе специально разработанных программ в операционной среде LINUX, взаимосвязь между которыми показана на рисунке 4. Для обеспечения работы этого комплекса программ в интерактивном режиме создан специализированный сайт в Интернет с визуализацией расчетных результатов.

8. ВЫВОДЫ

В НИИЯФ МГУ создана уникальная, полностью автоматизированная система для расчета радиационных условий в околоземном космическом пространстве и на траекториях низкоорбитальных спутников. Поступающая информация оперативно обрабатывается в Центре данных космического мониторинга НИИЯФ МГУ и используется для текущего анализа радиационных условий в ОКП. Система позволяет рассчитать энергетические спектры по данным измерений потоков энергичных частиц спутниками GOES с использованием моделей геомагнитного обрезания в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности, прогнозировать скорость солнечного ветра, а также суточные флуенсы релятивистских электронов на геостационарной орбите

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00098)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability // Space Science Reviews. 2003. V. 107. P. 295-302.
- [2] Belov A.V., Villaresi G., Dorman L.I. et al. Effect of the Space on Operation of Satellites // Geomagnetism and Aeronomy. 2004. V. 44. P. 502-510.

- [3] *Dorman L.I., Iucci N., Belov A.V. et al.* Space weather and spacecrafts anomalies // *Annales Geophysicae*. 2005. V. 23. № 9. P. 3009-3018.
- [4] *Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J.* Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. P. 1192-1205.
- [5] *Dorman L.I.* Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/ London. 2004. P. 855.
- [6] *Schrijver C.J., Kauristi K., Aylward A.D., Denardini C.M., Gibson S.E. et al.* Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS // *Advances in Space Research*, 2015. V. 55. P. 2745-2807.
- [7] *Slemzin V.A., Shugai Y.S.* Identification of coronal sources of the solar wind from solar images in the euV spectral range // *Cosmic Research*. 2015. V. 53. P. 47-58.
- [8] *Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Юшков Б.Ю., Бенгин В.В., Мутрукас В.Г.* Накопление поглощенной дозы на околоземных орбитах космических аппаратов при воздействии потоков частиц солнечных космических лучей // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2015. Т. 2. С. 20-23.

SPACE MONITORING DATA CENTER OF SINP MSU

V.V. Kalegaev, S.Yu. Bobrovnikov, N.V. Kuznetsov, I.N. Myagkova, Yu.S. Sugay

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (SINP MSU)

Radiation is one of the most dangerous factors of space weather. It is due to existence of the neutral and charged energetic particles in space and influences not only on-board electronics but also manned spacecrafts crew. So, taking into account the radiation conditions is ultimately important for practical human activity in space. Space monitoring data center (SMDC) of SINP MSU provides analysis and forecasting of the radiation conditions in the near-Earth's space (<http://swx.sinp.msu.ru/>). Using data measured on-board satellites and on-ground in the real-time mode, SMDC services allow determining the key parameters describing the solar and geomagnetic activity influencing the radiation environment of the Earth. The main components of the system are monitoring data of particle fluxes measured by satellites in energetic interval from hundreds of keV to hundreds of MeV, Sun observations and the models of space environment.

Keywords: space radiation, near Earth's environment, data bases

Kalegaev Vladimir Vladimirovich – head of the lab., SINP MSU, DSc, klg@dec1.sinp.msu.ru.

Bobrovnikov Sergey Yurievich – senior researcher, SINP MSU, PhD, bobrovnikov@msu.ru.

Kuznetsov Nikolay Viktorovich – senior researcher, SINP MSU, PhD, nvk@srd.sinp.msu.ru.

Myagkova Irina Nikolaevna – senior researcher, SINP MSU, PhD, irina@srd.sinp.msu.ru.

Sugay Yulia Sergeevna – senior researcher, SINP MSU, PhD, shugay@srd.sinp.msu.ru.

издатель

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

заказ № 4152

подписано в печать 20.07.2016

формат 170×100/16

бумага офсетная, печать офсетная, объем 10 п.л.

тираж 100 экз.