ПРОЯВЛЕНИЕ МОЩНЫХ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ

Г. Г. Беляев, В. М. Костин

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Представлены результаты работы лаборатории электрических и магнитных полей в магнитосфере ИЗМИРАН за период с 1980 г. по настоящее время. В обзоре приводятся наиболее важные достижения, полученные как в космических, так и в наземных экспериментах.

Ключевые слова: спутник, внешняя ионосфера, терминатор, циклон, ядерный взрыв, шумановский резонанс.

КОСМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Развитие спутниковых исследований в 1980 гг., комплексные исследования разнообразных явлений в системе Солнце-Земля, проведение целого ряда международных проектов по активному воздействию на ионосферу привело к объединению исследований сотрудников различных отделов и лабораторий ИЗМИРАН. Для подготовки и проведения экспериментов по измерению электрических полей на спутнике «Интеркосмос-18» (проект МАГИК — спутник «Интеркосмос-18» и чехословацкий субспутник МАГИОН) в 1983 г. была создана лаборатория электрических и магнитных полей в магнитосфере в отделе экспериментальной физики магнитосферы, возглавляемым И.А. Жулиным. Первым завлабом был избран В. М. Чмырев. В состав лаборатории перешли отдельные сотрудники отдела Я.Л. Альперта, отдела Н.П. Беньковой, лаборатории Я.И. Лихтера, зачислено несколько молодых специалистов из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), Горьковского государственного университета и Московского высшего технического училища имени Н.Э. Баумана. В последующем лабораторию с 1996 г. возглавлял Н.В. Исаев, а с 2007 г. — Г.Г. Беляев.

Сотрудники лаборатории в кооперации с российскими и зарубежными партнёрами принимали активное участие в разработке и изготовлении приборов для измерения электрических полей, излучений УНЧ (ультранизкие частоты; ULF — ultra-low-frequency) и ОНЧ (очень низкие частоты; VLF — very low frequency) в околоземной плазме на спутниках «Интеркосмос-Болгария-1300» («ИК-Болгария-1300», «ИК-Б-1300»), «Космос-1809» (проект ИОНОЗОНД-Э), «Интеркосмос-25» (проект АПЕКС) и других, а также принимали участие в научной обработке и физической интерпретации спутниковой информации.

Беляев Геннадий Геннадиевич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, belyev@izmiran.ru

Костин Владимир Михайлович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Кроме того, проводилась разработка и изготовление приборов для наземных измерений УНЧ-ОНЧ-излучений. Данная аппаратура использовалась для измерения шумановских резонансов (ШР) в обсерватории ИЗМИРАН «Лехта», удалённой регистрации подземных ядерных взрывов (ПЯВ) на Семипалатинском полигоне и взрывов при ликвидации ракет средней дальности на полигоне Капустин Яр под Волгоградом. Комплекс КНЧ-ОНЧ (крайне низкие частоты; ELF — extremely-low-frequency) является основным прибором автономных станций, развёрнутых совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) и Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного Отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) на Камчатке, для выделения ионосферных предвестников землетрясений.

Исследования высокоширотной ионосферы со спутника «Интеркосмос-Болгария-1300»

Спутник «ИК-Болгария-1300» был разработан в Болгарии и располагал комплексом из 11 научных инструментов, предназначенных для исследования физических процессов в ионосфере и магнитосфере. Два прибора были разработаны под руководством сотрудников ИЗМИРАН — магнитометр и ИЭСП — для измерений трёх компонент электрического и магнитного поля в диапазоне до 8 Гц [Stanev et al., 1983]. Спутник был запущен 7 августа 1981 г., в год 1300-летия образования Болгарии. Работал по 1983 г. на орбите с апогеем ~900 км, перигеем ~800 км и наклонением 81,3°. Это был первый спутник серии «Интеркосмос» с трёхосной стабилизацией аппаратуры, имеющей хорошее временное разрешение.

С помощью комплекса приборов для многокомпонентных волновых измерений на спутнике ИК-Б-1300 обнаружены и детально изучены мощные мелкомасштабные возмущения электрического и магнитного полей и плотности плазмы в зоне полярных сияний [Isaev et al., 1985]. На основе данных с приборов для измерений квазипостоянных электрических полей, потоков частиц, плотности плазмы и др., установленных на спутнике «ИК-Б-1300», исследован ряд процессов взаимодействия полей, частиц и токов в зоне полярных сияний [Беляев и др., 2010а; Исаев и др., 1987; Чмырев и др., 1986]. Изучены эффекты проникновения магнитосферных электрических полей на средние широты и их влияние на структуру главного ионосферного провала (ГИП) [Гдалевич и др., 1990; Isaev et al., 1987]. Разработаны эмпирические и аналитические модели электрического поля (ММП) [Исаев и др., 1991].

Исследования мощных естественных и антропогенных процессов в ионосфере земли со спутника «Космос-1809»

Спутник «Космос-1809» был копией спутника «Интеркосмос-19», разработанного под руководством ИЗМИРАН. Был запущен 18 ноября 1986 г. на квазикруговую орбиту с высотой ~960 км и наклонением 82°. Работал до 23 мая 1993 г. Первые полтора года выполнял по заданию Росгидромета основную задачу — радиозондирование ионосферы. После исчерпания ресурса ионозонда ИС-338 с 1989 г. спутник использовался в режиме мониторинга для выявления ионосферных эффектов от мощных естественных и антропогенных процессов на Земле и выявления проведения ядерных испытаний [Костин, Мурашов, 2002]. При подготовке проведения в 1988 г. совместных советско-американских работ по контролю ядерных испытаний к В.В. Мигулину обратились из службы специального контроля (ССК) с просьбой проверить возможность обнаружения ПЯВ со спутника, так как было известно, что В.В. Мигулин, В.И. Ларкина и др. получили диплом об открытии низкочастотных шумовых излучений на высотах верхней ионосферы, возникающих при сильных землетрясениях. Было поручено парторгу ИЗМИРАН В. М. Синельникову организовать группу для проведения работ. В этих работах участвовало около 30 сотрудников ИЗМИРАН из разных лабораторий.

Вариации параметров плазмы верхней ионосферы после подземных ядерных испытаний

Детально (режим ЗАП2) последействие ПЯВ на ионосферу изучалось со спутника «Космос-1809» при проведении совместных советско-американских экспериментов по контролю ПЯВ (СЭК) 17–19.08.1988 г. в Неваде (опыт Kearsarge) и 14–15.09.1988 г. в Семипалатинске (опыт на СЯП). В первый день над полигонами наблюдалось формирование области с резко изменённым спектром КНЧ-ОНЧ-шумов, интенсификация нестационарных областей воздействия мощных СДВ-радиопередатчиков (сверхдлинные волны), расположенных севернее полигонов [Беляев и др., 2010б; Костин, Мурашов, 2002]. Более устойчивые симметричные возмущения наблюдались в течение 2-3 дней после СЭК в магнитосопряжённых областях ионосферы южного полушария. В этих КНЧ-ОНЧ-возмущениях выделялась только электрическая компонента. В данных областях зафиксировано квазипостоянное электрическое поле ~10 мВ/м (рис. 1).

Остальные опыты, за 1987–1990 гг. около 20 ПЯВ, были зарегистрированы в режиме мониторинга (ЗАП4), Наиболее полная картина динамики возмущений в ионосфере при ПЯВ была получена для эксперимента ТЕРСАРКАНА в Неваде 10.02.1989 г. Опыт проводился в скважине глубиной 1267 м с зарядом 100 кт.

На рис. 1 представлено изменение амплитуды электрического поля в двух частотных каналах ОНЧ-волнового комплекса ИСЗ «Космос-1809» на двух последовательных витках при проведении ПЯВ. На рис. 1а показана разность сигналов (заштрихованная область), зарегистрированных на витке 10854, во время которого был проведён взрыв (приведены время и координаты ИСЗ) и на фоновом витке 10853, смещённом по долготе на 26,4° к востоку и по времени на 104 мин. Заштрихованная область на рис. 1b — превышение сигнала, измеренного на следующем витке 10855, над сигналом, измеренным на витке 10854.



Рис. 1. Изменение амплитуды электрического поля в двух частотных каналах ОНЧ-волнового комплекса искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-1809» при проведении опыта Texarkana в Неваде

Цифрами на рисунке отмечены: 1 — момент взрыва; 2 — прохождение магнитной оболочки (L-shell), проецирующейся по полю от D-слоя ионосферы над полигоном до ИСЗ; 3 — L-оболочка F_{max}; 4 — момент вхождения акустической волны в D-слой; 5 — вхождение ИСЗ в зону воздействия мегаватных СДВ-радиопередатчиков; 6 — экваториальная часть зоны ионосферного возмущения через 100 мин.; 7 — перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

Прохождение электромагнитного импульса (ЭМИ) чётко не определяется. Акустическое воздействие (АВ) приводит к формированию в ионосфере пояса КНЧ-турбулентности через 2,5 мин после взрыва. Эти результаты подтверждены наземными наблюдениями в КНЧ-диапазоне в других опытах и комплексными наблюдениями взрывов при ликвидации ракет под Волгоградом. Так, 21.10.1990 г. на полигоне Капустин Яр в 8:00 UT (Universal Time) было начато уничтожение связок ракет по 5–7 шт. общим эквивалентом ~100 т ТНТ (тротиловый эквивалент) в связке с интервалом 15 мин. На спутнике «Космос-1809», находившемся вблизи зенита, через 2,5 мин после начала подрывов был зарегистрирован сильный восходящий свист и развитие шумов в диапазоне частот до 1 кГц.

Отметим, что если аппаратура спутника «Космос-1809» была включена, то в день проведения опытов зарегистрированы все ПЯВ. Слабые ПЯВ (<10 кт) идентифицировались по изменению структуры зоны воздействия близко расположенных мощных СДВ-передатчиков. Последний ПЯВ, проведённый в России в октябре 1990 г., был зафиксирован ОНЧ-комплексом спутника «Интеркосмос-24» [Михайлов, 1998]. Анализ данных наблюдений спутника «Космос-1809» в сейсмоактивный период январь-февраль 1989 г., когда произошло более 100 землетрясений, показал [Chmyrev et al., 1997], что в области ($\Delta \lambda = \pm 6^{\circ}$), которая проецируется по магнитному полю на Е-слой ионосферы над очагом, наблюдается возрастание КНЧ-шумов и относительных вариаций плотности электронов, достигающих 10 % и имеющих масштаб 10...100 км. Перечисленные выше эффекты имеют региональную окраску. Эти результаты хорошо согласуются с более ранними наблюдениями на идентичном спутнике «Интеркосмос-19».

Крупномасштабные изменения в ионосфере при высокочастотном нагреве стендом СУРА по данным спутника «Космос-1809»

В 1991–1993 гг. было проведено более 70 включений коротковолнового (КВ) излучения стенда СУРА при пролётах спутника «Космос-1809» над ним и в магнитосопряжённом регионе. КВ-излучение стенда специальным образом менялось, что позволяло идентифицировать эффекты воздействия на ионосферу. Проводилась модуляция несущей с частотой 140, 450 и 850 Гц, которые совпадали с одним из фиксированных каналов ОНЧ-комплекса спутника, или модуляция прямоугольными импульсами длительностью от 1 до 10 с, что было связано с режимом опросности научных приборов. Стенд СУРА работал в большинстве экспериментов на одной из своих стандартных частот ниже критической частоты F-слоя.

Первые результаты были представлены в работе [Костин и др., 1993]. Последующие исследования показали, что диссипируемая энергия перераспределяется различными модами собственных колебаний плазмы и потоками частиц. Устанавливается пояс КНЧ- и НГР-турбулентности (нижний гибридный резонанс) по широте 400...800 км и по долготе >1000 км, который пронизан узкополосными 20...70 км щелевыми магнитосопряжёнными каналами с повышенной в 3...10 раз флуктуацией Ne и заполненные свистами. На спутнике в этих структурах может регистрироваться несколько свистов с разной дисперсией, наблюдения в широкой полосе 70 Гц – 20 кГц, но с фиксированными амплитудами, наблюдения в отдельных ОНЧ-каналах. Магнитосопряжённые области прогрева и области повышенного давления электронного газа формируются в масштабах меньших области электростатической турбулентности.

После выключения стенда СУРА КНЧ-турбулентность резко меняется через несколько секунд, а НГР — через 20...40 с. Каналы со свистами могут существовать несколько часов. Такая картина формирования устойчивого канала магнитосферного прохождения свистов наблюдалась на спутнике «Космос-1809» при акустическом воздействии сильных взрывов на D-слой.

Проведённые эксперименты с модуляцией КВ-нагрева показали, что локализованный энерговклад в ионосферу может резко изменить взаимодействие с ионосферой других мощных техногенных источников, отстоящих на 1000...2000 км, в частности, СДВ-передатчиков. Совместные исследования на спутниках «Космос-1809» и DE1 ионосферы над СДВ-передатчиком показали, что здесь присутствует магнитосферный канал, заполненный энергичными частицами [Sonwalkar et al., 1994].



Подавление образования bubbles при работе стенда Сура

Рис. 2. Подавление развития bubbles на $1, 1 \le L \le 1, 27$ при работе стенда СУРА

Последующие исследования показали, что в более сложных случаях, когда ВЧ-излучение стенда СУРА действует на неустойчивую плазму вблизи терминатора при высокой солнечной активности, то происходит подавление длинноволновых колебаний Рэлея-Тейлора и прекращение роста bubbles [Беляев и др., 2013] (рис. 2).

На рис. 2 представлены измерения плотности электронов на пяти последовательных витках 21.02.1991 г. в период высокой солнечной активности ($F_{10,7} \approx 300$). Звёздочками отмечены положение стенда СУРА и его магнитосопряжённая точка в южном полушарии. Траектории витков проходили за вечерним терминатором. До включения стенда СУРА (виток 21091) в экваториальной ионосфере наблюдалось интенсивное формирования bubbles. Работа стенда СУРА на витках 21092 и 21093 привела к подавлению bubbles на L = 1,1...1,27. После выключения стенда формирование bubbles на витках 21094, 21095 восстановилось. Следует отметить, что развитие тропического циклона (ТЦ) II категории Debra привело к увеличению плотности плазмы в ионосфере прилегающего региона (виток 21092).

Такие результаты обнаружены для четырёх рабочих дней, причём подавление bubbles происходило только к западу от плоскости магнитного меридиана стенда СУРА.

Возмущения верхней ионосферы, вызванные тропическими циклонами

Ионосфера является чувствительным индикатором мощных метеорологических процессов. Первоначально в ряде работ рассматривалось электрическое поле над очагами мощных грозовых разрядов и его прохождение в ионосферу [Исаев и др., 2002; Hegai et al., 1990]. В серии работ сотрудников ИЗМИРАН было показано, что модификация КНЧ-ОНЧ-колебаний над тропическими циклонами охватывает области большие, чем зона проникновения электрического поля [Бондур и др., 2008; Исаев и др., 2010; Mikhailova et al., 2002]. Вопросы влияния на ионосферу грозовой активности и возникающих внутренних гравитационных волн рассматривались на ряде международных конференций, материалы которых обычно представлены в специальных выпусках журнала Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics (JASTP).

Структуру ионосферы над ТС в настоящее время изучают с помощью ракетного зондирования, томографического зондирования как с низкоорбитальных спутников, так и навигационной системы GPS (Global Positioning System). Ретроспективный анализ данных комплексных измерений спутника «Космос-1809», таких как КНЧ-ОНЧ-колебания, плотность и температура плазмы, электрические поля, показал, что влияние ТЦ на ионосферу значительно сложнее, чем дополнение в модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) [Костин и др., 2015; Belyaev et al., 2012].

Ранее в работе [Исаев и др., 2010] подробно рассматривались параметры ионосферы в окрестности тайфуна V категории Наггу. Траектория спутника проходила приблизительно на 2° западнее «глаза» тайфуна (рис. 3).

Отчётливо выделяются следующие эффекты:

- пик плотности над «глазом» тайфуна, который возникает из-за столкновения нейтралов с ионами плазмы. Струя над высотным антициклоном, по-видимому, достигает высоты ~1500 км, что интерпретируется по характерному поведению электрического поля. Такая же зависимость наблюдалась и над тайфуном Sina [Костин и др., 2015];
- размытый максимум плотности проецируется по магнитному полю на Е-область широты тайфуна Наггу. Локальное повышение плотности плазмы в верхней ионосфере обнаруживается при интенсификации многих тропических циклонов, например, 24.09.1992 г., в половине из цепочки в 10 тайфунов I—III категорий [Костин и др., 2015].



Рис. 3. Формирование пика плотности плазмы в зените над «глазом» тайфуна Harry

Комплексный анализ данных со спутников «Космос-1809» и «Интеркосмос-Болгария-1300» во время развития сильных тропических циклонов позволил выявить следующее [Костин и др., 2015]:

- 1) дополнительное поступление плазмы над уединёнными ТЦ и её динамику;
- ионосферные предвестники усиления циклона до стадии урагана в виде локальных каверн депрессии плотности плазмы над ТЦ. Ранее такой предвестник устанавливался за сутки по резкому усилению грозовой активности;
- 3) смещение широкого максимума плотности плазмы в верхней ионосфере с геомагнитного экватора в область, центр которой проецируется по магнитному полю до высот 200...230 км на широте ТЦ, и возбуждение широкой полосы нижнегибридных колебаний. Данная стадия характерная для ТЦ, достигающих интенсивности I-II категории;
- 4) инжекцию узкой струи нейтралов в верхнюю ионосферу, которая сопровождает переход сильного ТЦ из категории II в более высокие категории, что косвенно подтверждается данными всех научных приборов спутника «Космос-1809». Ранее усиление развития ТЦ отмечалось по резкому изменению параметра спадания волнового спектра электронного содержания в ионосфере над сильнейшими ураганами 2004—2008 гг. в акватории Атлантического океана.

НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наземные эксперименты, проводимые лабораторией, сводились к сопровождению спутниковых проектов, изучению нелинейных эффектов в ионосфере при воздействии мощных СДВ- и СНЧ-передатчиков (сверхнизкие частоты), а также реакции параметров ионосферы при воздействии техногенных и антропогенных источников.

Мониторинг глобальной грозовой активности

Одной из таких работ стало изучение глобальной грозовой активности из одного измерительного пункта основанного на измерениях естественного электромагнитного поля в области частот глобального или шумановского резонанса. Естественные электромагнитные сигналы в области частот ШР принято делить на фон и всплески. Всплески представляют собой импульсы от сверхмощных молниевых разрядов, амплитуда которых превышает фон в 3–10 раз. Измерения всплесков позволяют решать обратную задачу и определять координаты молнии, параметры волновода Земля-ионосфера и спектр источника излучения. Такие методики используются для определения координат сверхмощных разрядов молний, которые обеспечивают достаточно высокое отношение сигнал/шум. Эти данные, наряду с оптическими наблюдениями из космоса, позволяют определять ряд важных параметров мировой грозовой активности. Однако статистика таких измерений (32 тыс. событий в год для космических измерений или несколько сотен

сверхмощных импульсов для наземных СНЧ-измерений) недостаточна для наблюдения динамики мировой грозовой активности на временных масштабах меньших, чем сезонные.

При наблюдениях ШР фона измеряют энергетические спектры различных компонент поля. При этом регистрируют вертикальное электрическое, одну или две скрещенные горизонтальные компоненты магнитного поля либо все три компоненты [Беляев и др., 1999]. Обработка полученных записей позволяет определить как эффективные параметры промежутка Земляионосфера, так и мировой грозовой активности.

Основное внимание в настоящей работе было уделено мониторингу вектора Умова-Пойнтинга, который в указанном диапазоне частот выполняется впервые. Применённая техника пеленгации ранее использовалась на более высоких частотах (f > 1 кГц) для пеленгации атмосфериков. В данной работе было доказано, что суточные вариации вектора Умова-Пойнтинга отражают динамику мировой грозовой активности.

Преимущества использования для пеленгации среднего вектора Умова-Пойнтинга по сравнению с обычными гониометрическими методами, основанными на узкополосной фильтрации сигналов ортогональных магнитных компонент, и сравнение их амплитуд состоят в следующем.

- Вектор Умова-Пойнтинга однозначно указывает направление распространения потока энергии от источника. Таким образом, автоматически устраняется проблема неоднозначности определения азимута ±180°.
- Для определения пеленга используется вся рабочая полоса частот, что способствует улучшению соотношения уровня сигнала к аппаратному шуму в случае неравномерного спектра сигнала.
- Вычисление вектора Умова-Пойнтинга аналогично процедуре оптимальной фильтрации, при которой спектр магнитных компонент служит передаточной функцией для сигнала электрической компоненты. При работе в широкой полосе частот вклад от когерентных линейно поляризованных частотных компонент поля преобладает, что повышает точность пеленгации. Данное обстоятельство играет существенную роль в случае частично нелинейной поляризации сигнала, а также, когда в эксперименте на электрическую или магнитные антенны воздействуют помехи. В частности, как правило, электрическая антенна в большей степени подвержена влиянию атмосферных условий по сравнению с магнитными антеннами. При этом сигналы с магнитных антенн «вытягивают» из зашумлённой электрической компоненты когерентные составляющие, что позволяет уменьшить результирующую помеху при вычислении компонент вектора Умова-Пойнтинга и, соответственно, азимутов прихода излучения.

Расчёт средних компонент вектора Умова-Пойнтинга для используемой модели кругового очага даёт точное направление на его центр из пункта наблюдения (рис. 4.). При использовании в модели двух распределённых очагов суммарный пеленг направлен между ними, т.е. на некоторый «центр тяжести». «Вес» отдельного очага определяется дальностью до него, плотностью источников и амплитудами токовых моментов. При наличии в модели нескольких не равноудалённых очагов появляется частотная зависимость направления среднего вектора Умова-Пойнтинга, что объясняется различным вкладом в поток энергии в разных модах ШР в зависимости от дистанции до источников. Таким образом, расчёты показывают, что направление среднего вектора Умова-Пойнтинга должно отслеживать положение некоего центра тяжести, который в течение суток смещается в соответствии с перераспределением активности между мировыми грозовыми центрами (МГЦ) вслед за движением Солнца [Belyaev et al., 1999]. Суточные вариации при этом будут зависеть от соотношения минимальных и максимальных уровней активности в каждом МГЦ, а также от выбора точки наблюдения (рис. 4).

Результатом этой работы, которая выполнялась в рамках гранта ИНТАС (INTAS — International Association for the Promotion of Cooperation with Scientists from the New Independent States of the Former Soviet Union) совместно Институтом радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ, Харьков) стало доказательство того, что интерпретация суточных вариаций направления вектора Умова-Пойнтинга указывает на существование дополнительного максимума активности африканского МГЦ, при этом в суточном ходе направление вектора меняется в сторону, противоположную к движению Солнца.



Рис. 4. Пример регистрации трёх компонент поля в диапазоне ШР и вычисления средних компонент вектора Умова-Пойнтинга

Удалённая регистрация подземных ядерных взрывов

Лаборатория участвовала в работах ИЗМИРАН на семипалатинском полигоне по исследованию воздействия подземных ядерных взрывов на ионосферу под общим научным руководством В.В. Мигулина. Сложность выделения ЭМИ от взрывов на фоне близких и далёких молниевых разрядов заключается в том, что их амплитудно-временные и спектральные характеристики очень похожи. В ходе проведения работ удалось создать и успешно испытать КНЧ-аппаратуру и датчики магнитного поля, оптимизированных для наблюдения электромагнитных сигналов от подземных ядерных взрывов.

Полученные результаты являются апостериорным обобщением опытных данных, полученных в серии натурных экспериментов в периоды проведения экспедиционных работ. Источниками возмущений являлись подземные ядерные взрывы, энергетический эквивалент которых менялся от 0,5 до 150 тыс. т.

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что динамический спектр регистрируемых процессов на определённом временном интервале после взрыва, наряду со случайной, содержит регулярную компоненту магнитных возмущений, которая делает уникальным магнитный «портрет» источника возмущений. Были предложены простые модели их возникновения. Предложена и апробирована методика обнаружения камуфлетного (скрытого) ядерного взрыва.

Коллективом сотрудников ИЗМИРАН и полигона получено авторское свидетельство за разработку новой методики удалённого обнаружения таких взрывов и определения их параметров [Беляев, 1990].

Мониторинг ионосферных предвестников землетрясений

По результатам 10-летнего исследования сейсмо-электромагнитных явлений на Камчатке получены данные, свидетельствующие о возможности их использования для краткосрочного прогноза времени, места и магнитуды локальных землетрясений.

На рис. 5 показаны динамические спектры геомагнитных пульсаций в области частот шумановских резонансов по двум компонентам Н и D, зарегистрированных на обсерватории Карымшино.

Спектры демонстрируют исключительно низкий уровень индустриальных помех в этом месте, позволяющий одновременно видеть до 5-6 шумановских резонансов. В нижней части рисунка представлен вейвлет-спектр, построенный в том же частотном диапазоне. Можно отметить изменение поляризации принимаемых сигналов в местную полночь и правую поляризацию шумановских резонансов. В нижней части частотного диапазона видны альвеновские ионосферные резонансы.

Из полученных результатов наиболее перспективными для краткосрочного прогноза являются: эффект депрессии ULF-вариаций магнитного поля [Schekotov et al., 2006] и эффект возбуждения ULF/ELF-излучений в атмосфере [Schekotov et al., 2007], возникающие за 1–5 дней перед мощными (Ms > 5,5) коровыми землетрясениями с эпицентральным расстоянием <300...500 км.



ис. 5. Суточная вариация спектров геомагнитных пульсаций в области частот шумановских резонансов

Первый из них проявляется в уменьшении вариаций поля в диапазоне 0,01...0,1 Гц в окрестности местной полуночи и линейно зависит от магнитуды предстоящего землетрясения. Второй — характеризуется возникновением широкополосного излучения в диапазоне от единиц до десятков герц. Во временной области сигнал напоминает импульсы от молниевых разрядов с азимутом источника излучения, примерно совпадающим с направлением на эпицентр будущего землетрясения [Schekotov et al., 2008]. Оба эффекта подтверждены многолетней статистикой.

Работа была выполнена совместно с коллективом учёных ИФЗ РАН в рамках гранта МНТЦ (Международный научно-технический центр).

В настоящее время в лаборатории проводится работа по подготовке космического эксперимента РЕЗОНАНС (изучение эффектов магнитосферного мазера).

ЛИТЕРАТУРА

- [Беляев и др., 1999] *Беляев Г. Г., Николаенко А. П., Швец А. В., Щекотов А. Ю.* Наблюдения за движением мировой грозовой активности по анализу трёхкомпонентных измерений шумановских резонансов // Радиофизика и электроника. 1999. Т. 4. №1. С. 63–69.
- [Беляев и др., 1990] Беляев Г. Г., Костин В. М., Мурашов В. Н., Чмырев В. М. Способ обнаружения камуфлетного взрыва: А.С. № 322084. СССР: МКл 5/G 21 J5/00. 1990.

- [Беляев и др., 2010а] Беляев Г., Костин В., Трушкина Е., Овчаренко О., Бойчев Б., Банков Н. Взаимодействие косых альвеновских волн с ионосферой по данным спутника «Интеркосмос-Болгария-1300» // Proc. SENS 2009. Sofia, Bulgaria. 2010. Р. 13–19.
- [Беляев и др., 20106] Беляев Г.Д., Костин В. М., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я. Вариации параметров плазмы верхней ионосферы после подземных ядерных испытаний // Сб. докладов 5-й Международ. конф. «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН. 2010. С. 342–348.
- [Беляев и др., 2013] Беляев Г. Г., Бойчев Б., Костин В. М., Комраков Г. П., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я. Аномальные структуры в верхней ионосфере и их модификация при мощном высокочастотном нагреве по данным спутников «Интеркосмос-Болгария-1300» и «Космос-1809» // Сб. тр. 8-й Науч. конф. «Космос, Экология, Безопасность». ИКИ БАН, София, Болгария. 2013. С. 112–118.
- [Бондур и др., 2008] Бондур В. Г., Пулинец С. А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Физические основы исследования Земли из космоса. 2008. № 6. С. 3–11.
- [Гдалевич и др., 1990] *Гдалевич Г., Исаев Н., Губский В., Трушкина Е.*, Станев *Г.* Влияние электрического поля на структуру главного ионосферного провала // Космич. исслед. 1990. Т. 28. Вып. 2. С. 235–242.
- [Исаев и др., 1987] Исаев Н. В., Яхнин А. Г., Биличенко С. В., Чмырев В. М., Станев Г., Пеллинен Р., Теодосиев Д., Колосова Т. Н., Тельцов М. В., Лазарев В. И., Тимофеев Е. Е., Петков Н., Трушкина Е. П., Школьникова С. И. Сопоставление спутниковых измерений электрических и магнитных полей и потоков частиц с наземными геофизическими данными в раннем утреннем секторе авроральной зоны // Космич. исслед. 1987. Т. 25. № 1. С. 74–85.
- [Исаев и др., 1991] Исаев Н. В., Осипов Н. К., Станев Г., Трушкина Е. П. Электрическое поле в высокоширотной ионосфере при больших положительных величинах *B*_z-компонент межпланетного магнитного поля (ММП) по данным измерений на ИСЗ «ИК-Болгария-1300» // Bulgaarian Geophysical J. 1991. V. 27. No. 1. P. 29–36.
- [Исаев и др., 2002] Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М., Серебрякова О. Н., Ященко А. К. Возмущение электрического поля в ионосфере морскими штормами и тайфунами // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 6. С. 591–597.
- [Исаев и др., 2010] Исаев Н. В., Костин В. М., Беляев Г. Г., Овчаренко О. Я., Трушкина Е. П. Возмущение верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 253–264.
- [Костин, Мурашев, 2002] *Костин В. М., Мурашев В. Н.* Экспериментальные исследования возможностей спутникового радиомониторинга подземных ядерных испытаний // Рождённая атомным веком: сб. ст. / Под ред. А. П. Васильева. М.: ССК. 2002. Т. 3. С. 178–191.
- [Костин и др., 1993] Костин В. М., Романовский Ю. А., Чмырев В. М., Борисов Н. Д., Исаев Н. В., Комраков Г. П., Михайлов Ю. М., Намазов С. А., Овчаренко О. Я., Соболев Я. П., Трушкина Е. П., Селигей В. Спутниковые исследования возмущений внешней ионосферы при воздействии мощных КВ-радиоволн на F-область ионосферы // Космич. исслед. 1993. Т. 31. № 1. С. 84–99.
- [Костин и др., 2015] Костин В. М., Беляев Г. Г., Бойчев Б., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я. Ионосферные предвестники усиления уединённых тропических циклонов по данным спутников «ИКБ-1300» и «Космос-1809» // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 2. С. 258–273.

- [Михайлов, 1998] *Михайлов Ю. М.* ОНЧ-эффекты во внешней ионосфере от подземного атомного взрыва на Новой Земле 24 октября 1990 г.: данные спутника «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм аэрономия. 1998. Т. 38. № 6. С. 738–743.
- [Чмырев и др., 1986] *Чмырев В. М., Биличенко С. В., Казанская Ю. Б., Костин В. М., Лазарев В. И., Тельцов М. В.* Авроральные частицы, связанные с нелинейными альвеновскими волнами // Геомагнетизм аэрономия. 1986. Т. 26. № 2. С. 275–281.
- [Belyaev et al., 1999] *Belyaev G. G., Schekotov A. Yu., Shvets A. V., Nikolaenko A. P.* Schumann resonances observed using Pointing vector spectra // J. Atmos. Terr. Phys. 1999. V. 61. P. 751–763.
- [Belyaev et al., 2012] Belyaev G., Bankov N., Boychev B., Kostin V., Trushkina E., Ovcharenko O. Observation of Plasma Oscillating Structures in External Ionosphere over Cyclones // Sun and Geosphere. 2012. V. 7. No. 1. P. 51–55.
- [Chmyrev et al., 1997] *Chmyrev V. M., Isaev N. V., Serebryakova O. N.* et al. Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over an earthquake region // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. No. 9. P. 967–974.
- [Hegai et al., 1990] *Hegai V. V., Kim V. P., Illich-Svitych P. V.* The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-regin above a thundercloud // Planet. Space Sci. 1990. V. 38. P. 703–707.
- [Isaev et al., 1985] Isaev N. V., Yachnin A. G., Bilichenko S. V., Lazarev V. I., Stanev G.A., Teodossiev D. K., Petkov N., Timofeev E. E., Chmyrev V. M. A comparison of satellite measurements of electric and magnetic fields and particle fluxes with ground-based data // Adv. Space Res. 1985. V. 3. No. 5. P. 101–107.
- [Isaev et al., 1987] Isaev N. V., Gdalevich G. L., Benkova N. P., Gubsky V., Trushkina E. P., Kozlov E. F., Samorokin N. I., Stanev G., Teodosiev D., Samardjiev T. Auroral electric field penetration into the middle-latitude trough // Adv. Space Res. 1987. V. 7. No. 8. P. 59–65.
- [Mikhailova et al., 2002] *Mikhailova G.A., Mikhailov Yu. M., Kapustina O. V.* Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2002. V. 30. No. 11. P. 2613–2618.
- [Schekotov et al., 2006] Schekotov A., Molchanov O., Hattori K., Fedorov E., Gladyshev V. A., Belyaev G. G., Chebrov V., Sinitsin V., Gordeev E., Hayakawa M. Seismo-Ionospheric Depression of the ULF Geomagnetic Fluctuations at Kamchatka and Japan // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31. P. 313–318.
- [Schekotov et al., 2007] Schekotov A. Y., Molchanov O. A., Hayakawa M., Fedorov E. N., Chebrov V. N., Sinitsin V. I., Gordeev E. E., Belyaev G. G., Yagova N. V. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity // Radio Sci. 2007. V. 42. RS6S90. doi: 10.1029/2005RS003441.
- [Schekotov et al., 2008] Schekotov A. Y., Molchanov O. A., Hayakawa M., Fedorov E. N., Chebrov V. N., Sinitsin V. I., Gordeev E. E., Andreevsky S. E., Belyaev G. G., Yagova N. V., Gladishev V. A., Baransky L. N. About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2008. V. 8. P. 1237–1242.
- [Sonwalkar et al., 1994] Sonwalkar V.S., Inan U.S., Bell T.F., Helliwell R.A., Chmyrev V.M., Sobolev Ya. P., Ovcharenko O. Ya., Selegej V. Simultaneous observations of VLF ground transmitter signals on the DE 1 and COSMOS 1809 satellites: Detection of a magnetospheric caustic and a duct // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A9. P. 17,511–17,522.
- [Stanev et al., 1983] Stanev G., Petrunova M., Teodosiev D., Kutiev I., Serafimov K., Chapkunov S., Chmyrev V., Isaev N., Puschaev P., Pimenov I. An instrument for DC electric field and AG-electric and magnetic field measurements aboard Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite // Adv. Space Res. 1983. V. 2. No. 7. P. 43–47.

DETECTION A POWERFUL NATURAL AND ANTHROPOGENIC PROCESSES IN THE IONOSPHERE

G. G. Belyaev, V. M. Kostin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

This review presents the most important achievements obtained in both the space and groundbased experiments. Research results the laboratory of electric and magnetic fields in the magnetosphere IZMIRAN for the period from 1980 to present time were shown.

Keywords: satellite, external ionosphere, cyclones, terminator, Schumann resonance.

Belyaev Gennady Gennadievich — head of laboratory, PhD, belyev@jzmiran.ru Kostin Vladimir Mikhailovich — senior scientist, PhD