

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ С ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БРЗ

*Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, И.Э. Маркович, Ю.В. Поклад,
И.А. Ряховский, В.В. Яким*

В период проведения экспедиций в Байкальскую рифтовую зону (БРЗ) в 2009 и 2010 гг. проведены измерения вариаций геомагнитного и электрического полей и полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с использованием наземной и спутниковой аппаратуры. Обнаружены синхронные всплески магнитного поля на Земле и в ионосфере, обусловленные распространением электромагнитных возмущений, генерируемых удаленными молниевыми разрядами. Показано, что в районе проводимых исследований существует область преимущественного распространения сигналов кГц диапазона из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу. Анализ результатов измерений позволил обнаружить всплески ПЭС, проекция которых на поверхность Земли совпадает с геоморфологическими границами юго-западной части БРЗ.

Введение

Ведущиеся в течение нескольких десятилетий исследования проблемы литосферно-ионосферных связей (ЛИС) обеспечили получение значительного экспериментального материала, обобщение и анализ которого привели к созданию большого количества гипотез, описывающих механизмы ЛИС. В тоже время, одной из проблем исследования ЛИС является противоречивость экспериментальных данных о связи вариаций геофизических полей на поверхности Земли с процессами в ионосфере, а методы проведения измерений не всегда корректны. В этих условиях получение новых экспериментальных данных о связи электромагнитных возмущений и вариаций параметров ионосферы с литосферными структурами остается актуальным.

Места проведения экспериментальных наблюдений приземных и ионосферных проявлений ЛИС выбраны, исходя из результатов исследований вариаций ионосферных параметров по данным ИСЗ DE-2 и Demeter [2]. Выявленные в результате анализа этих данных зоны повышенной электромагнитной активности частично совпали с крупными промышленными центрами, энергетическими объектами, мощными радиостанциями. В тоже время, значительная часть таких зон не связана с антропогенной деятельностью и расположена над крупными разломами земной коры. Одно из пятен повышенной электромагнитной активности было обнаружено над юго-западной частью БРЗ.

Для проведения наземных измерений электромагнитных полей, акустических волн, эманаций радона, сейсмических и радиофизических наблюдений были орга-

низованы две экспедиции (в 2009 и 2010 гг.) в район Тункинского рифта, который характеризуется развитой системой разломов земной коры. Район проведения наземных измерений располагался на пересечении Тункинского трансформного разлома, Главного Саянского и Северо-Тункинского разломов. Исследования проводились в условиях стационарного измерительного пункта и мобильными полевыми отрядами на площади около 5000 км². Детальные электромагнитные и сейсмические наблюдения проводились в районе пос. Аршан, находящегося на пересечении Тункинского разлома и субмеридионального разлома по линии Аршан–Улан-Горхон. Район, в частности, характеризуется выходом на поверхность графитизированных известняков и радоновых источников, что может приводить к возникновению локальных геоэлектрических аномалий и изменению проводимости приземного слоя атмосферы.

В стационарном пункте измерений, размещавшемся на базе радиофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН «Торы» (51°58.6' N, 103°4.7' E), были развернуты измерительный приемник Rohde & Schwarz ESCI с частотным диапазоном 9 кГц – 3 ГГц, феррозондовый магнитометр LEMI-018 для измерения вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0–1 Гц, двухчастотный приемник системы GPS, электростатический флюксометр ИНЭП для измерения приземного электрического поля в диапазоне частот 0–100 Гц, измеритель электрического поля в грунте ИВЭП, акустический измерительный комплекс, работающий в диапазоне частот 0,01 Гц–20 Гц, радиометр РРА-01М-03 для измерения концентрации подпочвенного радона, сейсмоприемники СМЗ-КВ-Э. Мобильные измерительные пункты были оборудованы индукционными магнитометрами MFS-06 и MFS-07 с регистратором ADU-07, средствами измерения электрического поля в атмосфере и грунте.

Данные по вариациям ионосферных параметров были получены с французского спутника DEMETER, специально разработанного для проведения исследований ЛИС [3]. Для проведения измерений вариаций электрического и магнитного полей и параметров ионосферы, согласованных с наземными измерениями, бортовая аппаратура спутника при его пролетах над зоной работы экспедиций включалась в режим быстрой записи, что позволило анализировать не только спектральные, но и волновые формы сигналов.

На рис. 1 представлена карта района проведения наблюдений в 2009 г. с указанием стационарного пункта и точек проведения мобильных измерений. В период работы двух экспедиций был получен значительный объем экспериментального материала. В статье обсуждаются результаты электромагнитных и радиофизических измерений.

Наземные и спутниковые измерения сигналов удаленных молниевых разрядов

Проведение согласованных измерений вариаций магнитного поля на Земле и в ионосфере было обеспечено использованием наземной и бортовой аппаратуры с близкими техническими характеристиками. Бортовой магнитометр спутника Demeter и наземный магнитометр MFS-07 обеспечили измерение магнитного поля в диапазоне частот от 1 Гц до 20 кГц при чувствительности ~1 пТ.



Рис. 1. Схема расположения основных измерительных пунктов. На рисунке: Толу – радиофизическая обсерватория ИСЗФ (51.5 N, 103 E), E – стационарные измерения электрического поля, M – магнитные измерения, SM – сейсмометры, LFM – ЛЧМ ионизонд ИСЗФ, Rn – датчик района, МТЦ – датчик магнито-теллурических токов, GPS – комплекс определения полного электронного содержания ионосферы, SWR – KB приемник R&S, 1-13 – пункты профильных измерений электрического поля

Обнаруженные синхронные импульсы магнитного поля в диапазоне частот 100 Гц–2 кГц спутниковым и наземным магнитометрами ставят вопрос об их происхождении, направлении и условиях распространения. Специфическая форма и спектральный состав импульсов позволяет отнести их к сферикам (или твикам) – электромагнитным сигналам, генерируемым молниевыми разрядами и распространяющимся в волноводе Земля – ионосфера на тысячи километров. Появление сфериков на высоте пролета спутника Demeter (~700 км) обусловлено частичным проникновением этих сигналов через верхнюю стенку волновода. Условия прохождения сфериков в ионосферу исследовались многими авторами. В [4, 5] показано, что сферики могут проникать в ионосферу в зоне ее облучения мощными передатчиками, способными создавать ионосферные неоднородности. В экваториальной зоне НЧ волны от молнии способны вызывать даже взрывной распад F-слоя ионосферы (explosive spread F) из-за возникновения параметрической неустойчивости

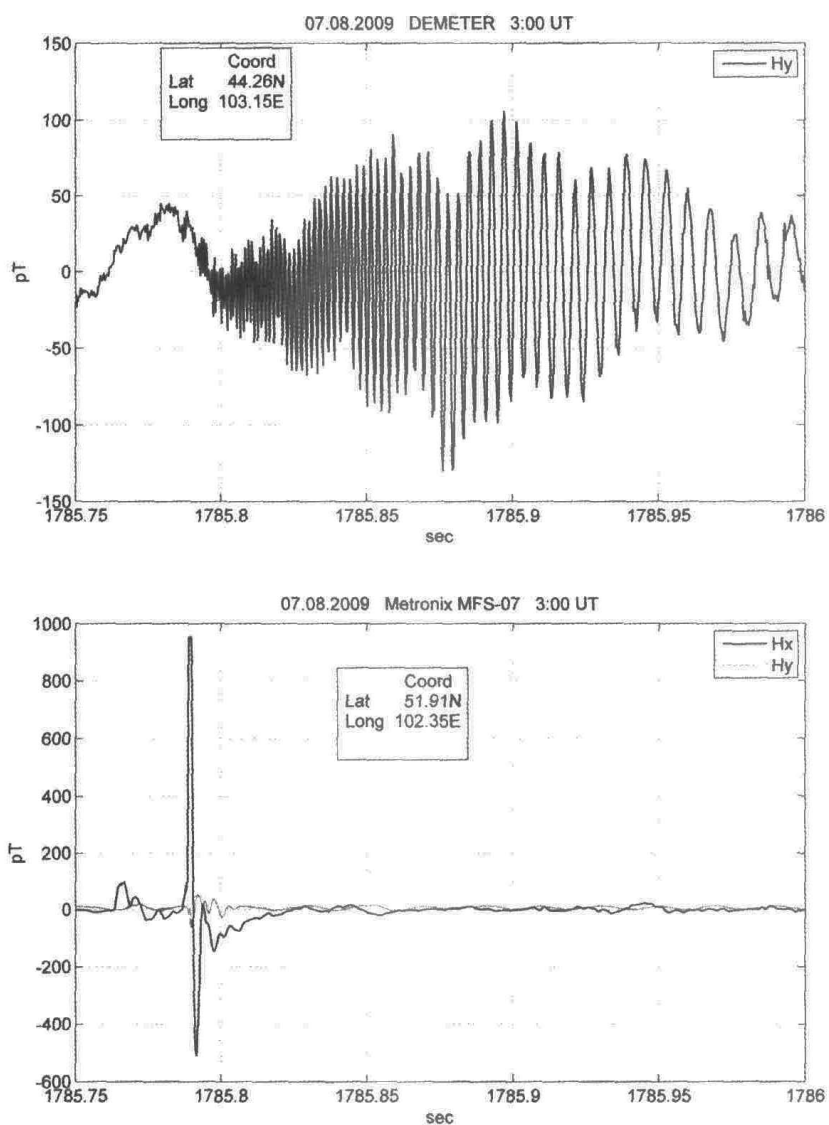


Рис. 2. Синхронные вариации магнитного поля в ионосфере (верхняя панель – Demeter) и на земле (нижняя панель – Metronix).

На рис. 2 показаны записи синхронных вариаций магнитного поля в ионосфере и на Земле. Анализ зависимости количества зарегистрированных в ионосфере сигналов от координат спутника показал, что существует область преимущественного появления электромагнитных импульсов. На рис. 3 показан график относительной частоты регистрации сигналов при пролетах спутника над зоной размерами 1600×2000 км в диапазоне широт $42\text{--}58$ гр. с.ш. и долгот $93\text{--}113$ гр. в.д. Показаны проекции пролетов спутника и результат счета импульсов на сетке с ячейкой в 1 градус. Оказалось, что область преимущественного проникновения сигналов в ионосферу расположена в диапазоне $52^\circ\text{--}55^\circ$ с.ш. и $98^\circ\text{--}103^\circ$ в.д. и занимает область $\sim 400 \times 500$ км.

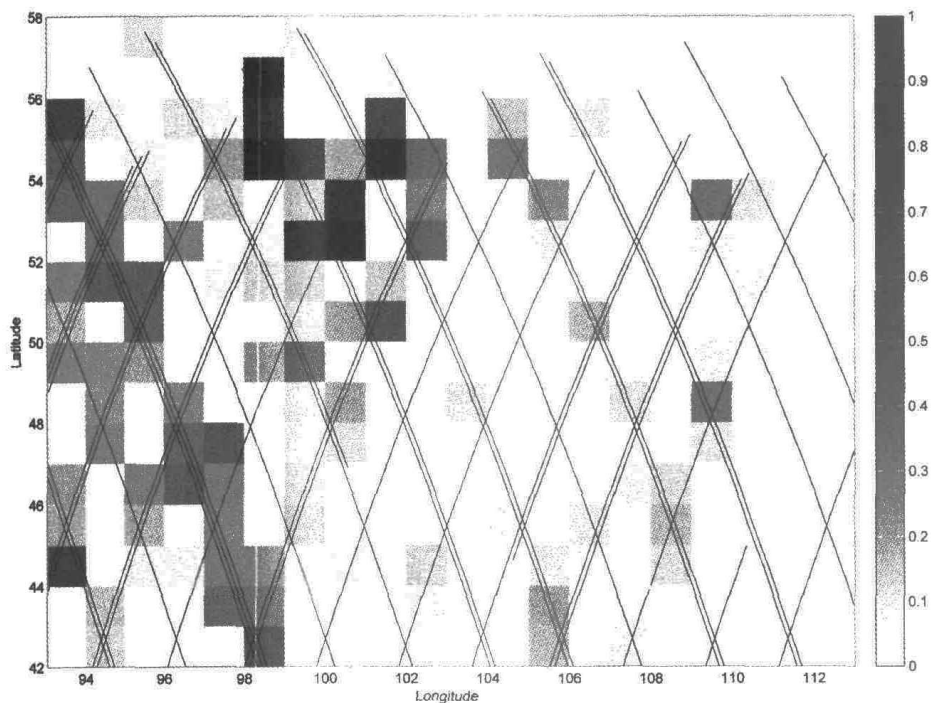


Рис. 3. График относительного количества (шкала справа) сфериков, зарегистрированных бортовым магнитометром спутника Demeter в зоне $42^\circ\text{--}58^\circ$ с.ш., $93^\circ\text{--}113^\circ$ в.д. Шаг сетки – один градус. Косые линии – проекция пролетов спутника.

В ряде случаев удалось провести точное сопоставление времени регистрации сигналов на Земле и в ионосфере. Так, при пролете спутника Demeter с юга на север 13.08.2009 г. было зафиксировано 6 событий, которые однозначно коррелируют с записями индукционных магнитометров. По записям волновых форм с точностью около 1 мс были определены задержки сигналов, зарегистрированных аппаратурой спутника по отношению к сигналу, зарегистрированному наземным магнитометром в разных точках трассы пролета спутника (рис. 4). Оказалось, что задержка имеет минимальное значение в центре той же зоны регистрации максимального количества твиков спутником Demeter.

Нам не удалось связать выделенную зону преимущественного распространения сфериков в ионосферу с определенными антропогенными или природными факторами.

В точке с координатами 52,4° с.ш. и 103,7° в.д. в ~350 км от центра этого района функционирует мощная радиостанция. Однако диаграмма направленности излучения станции не совпадает с выделенной зоной. Не выявлены в этом районе и существенные структурные особенности литосферы.

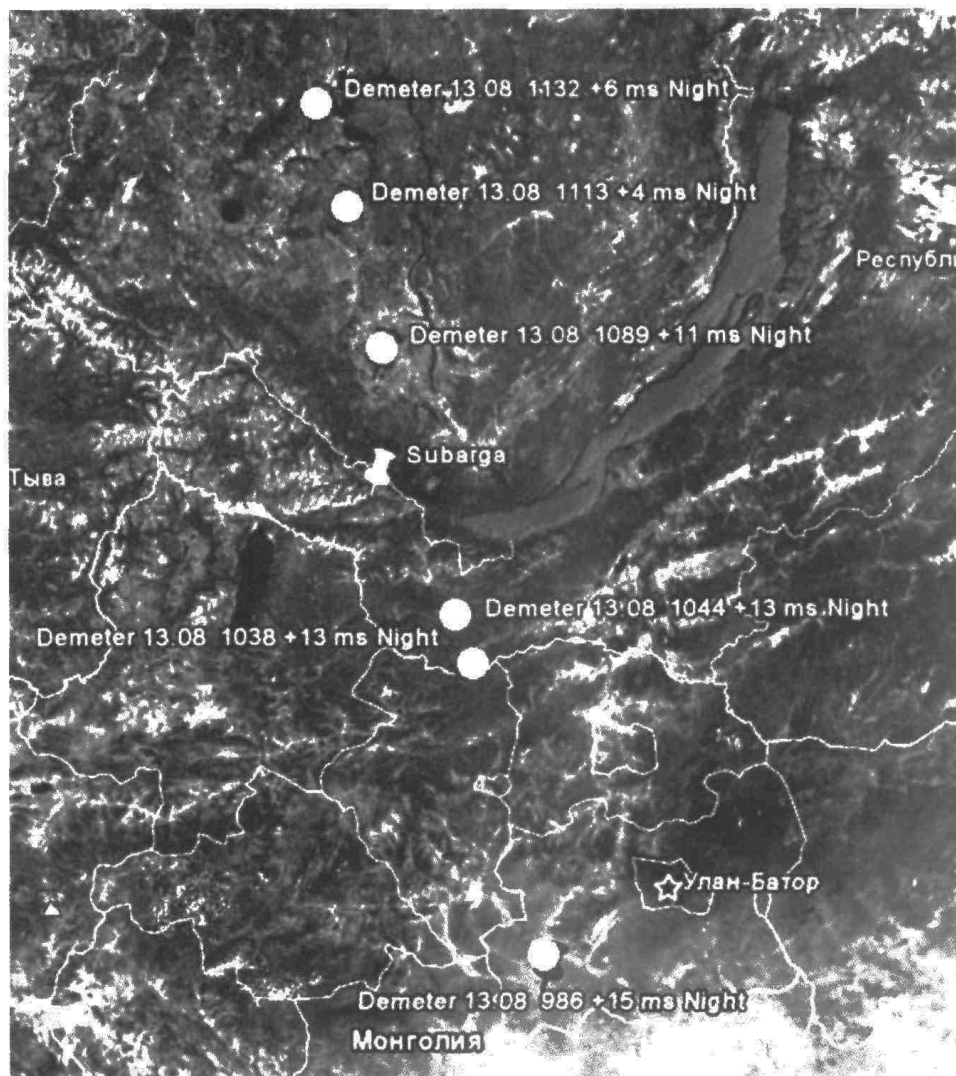


Рис. 4. Изменение задержки регистрируемых спутником сигналов по отношению к времени регистрации наземным магнитометром. Время задержки в м/с указано для шести положений спутника Demeter.

Измерение вариаций полного электронного содержания ионосферы

По данным измерений двухчастотным приемником GPS PREGO, установленным в обсерватории Торы, проводился анализ вариаций ПЭС ионосферы. С учетом того, что основная часть заряженных частиц в луче приемник – спутник GPS приходится на F-слой ионосферы, значение ПЭС в каждый момент времени присваивалось точке пересечения луча приемник – спутник со сферой на высоте 300 км (далее ИТ – ионосферная точка). Рассматривались только лучи с возвышением больше

30° при условии, что ИТ находятся в квадрате размером 1000x1000 км с центром в п. Торы. Было обнаружено, что для траекторией перемещения ИТ через эту зону с севера на юг наблюдается изменение характера вариаций ПЭС. Существует граница, севернее которой отмечаются интенсивные колебания ПЭС на частотах до 20 мГц. Южнее этой границы, проходящей примерно на 54° с.ш., такие колебания практически не наблюдаются. На верхней панели рис. 5 показан результат совмещения записей ПЭС, полученных при 12 пролетах спутников в направлении северо-запад – юго-восток, а на нижней панели – вейвлет-спектр вариаций ПЭС на той же трассе для одного пролета спутника G20 13 июля 2010 г. с 2 до 3 UT.

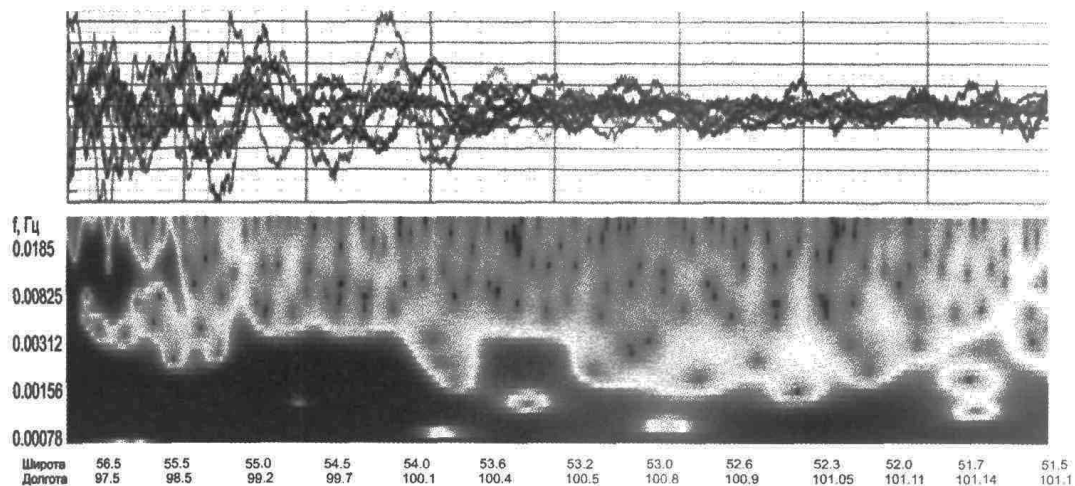


Рис. 5. Совмещенные по координатам волновые формы 12 записей вариаций ПЭС при перемещении ИТ в направлении северо-запад – юго-восток (верхняя панель). Вейвлет-спектр вариаций ПЭС на той же трассе для одного пролета спутника G20 13 июля 2010 г. с 2 до 3 UT (нижняя панель)

Обнаруженное изменение спектрального состава вариаций ПЭС, при перемещении ИТ в направлении север-юг не имеет однозначного объяснения. Значительные низкочастотные флуктуации ПЭС в северной части траектории могли бы быть связаны с авроральными возмущениями, однако период измерений характеризуется как магнитоспокойный. Связи с возможными высыпаниями заряженных частиц по данным аппаратуры спутника Demeter также не обнаружено. Однако совпадение широты изменения характера ПЭС (~54° с.ш.) с зоной преимущественного проникновения сфериков в ионосферу (рис. 6) может свидетельствовать об общей природе этих явлений.

Анализ всех выполненных в период проведения измерений ПЭС в июле 2010 г. показал, что наряду с относительно медленными изменениями зарегистрированы всплески ПЭС длительностью 5–10 минут (пример такой записи вариаций ПЭС – верхняя кривая на рис. 7). При этом проекции ИТ, в которых были отмечены всплески ПЭС, оказались сконцентрированы в зонах, примерно соответствующих геоморфологическим границам юго-западной части БРЗ. Верхняя ветвь распределения соответствуют пролеганию Главного Саянского разлома. Концентрация точек обнаруживается и на пересечении Главного Саянского и Тункинского разломов (рис. 8).

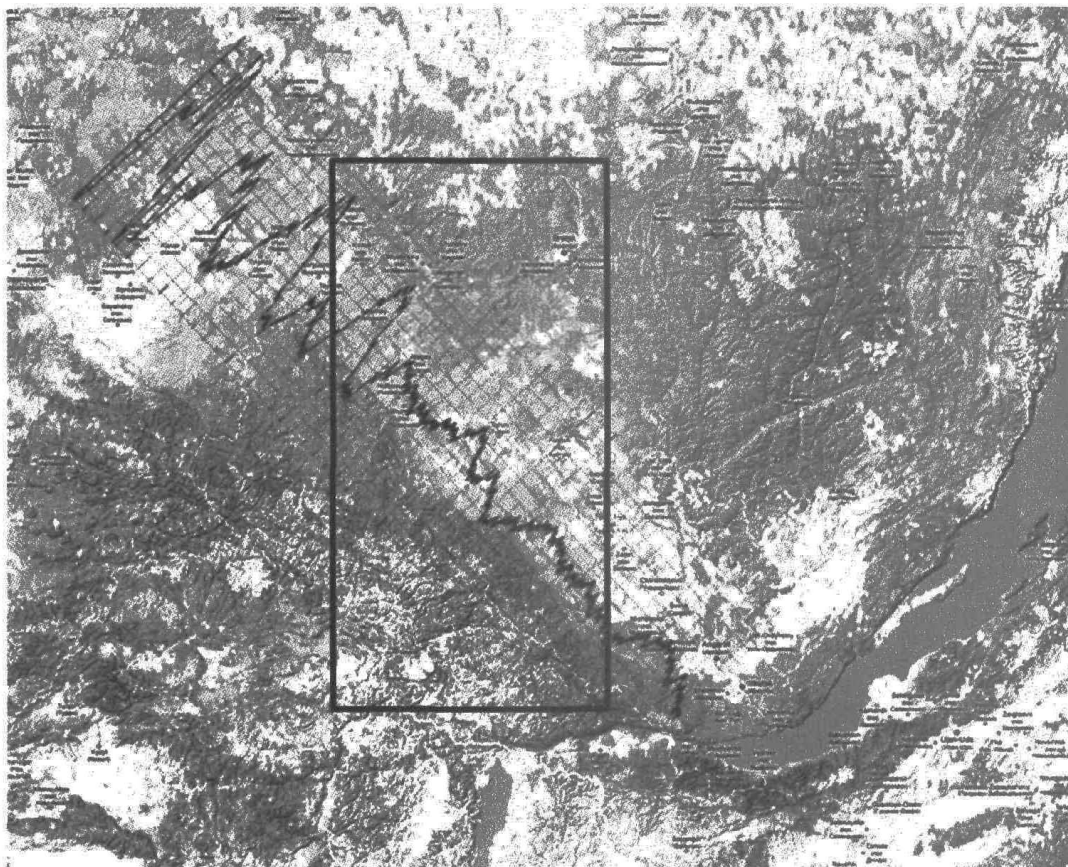


Рис. 6. Фрагмент карты юго-западной части БРЗ. Прямоугольник показывает область регистрации спутником Demeter наибольшего количества сфериков по данным рис. 4. Черная кривая – запись вариаций ПЭС при перемещении ИТ в направлении север-запад – юго-восток.

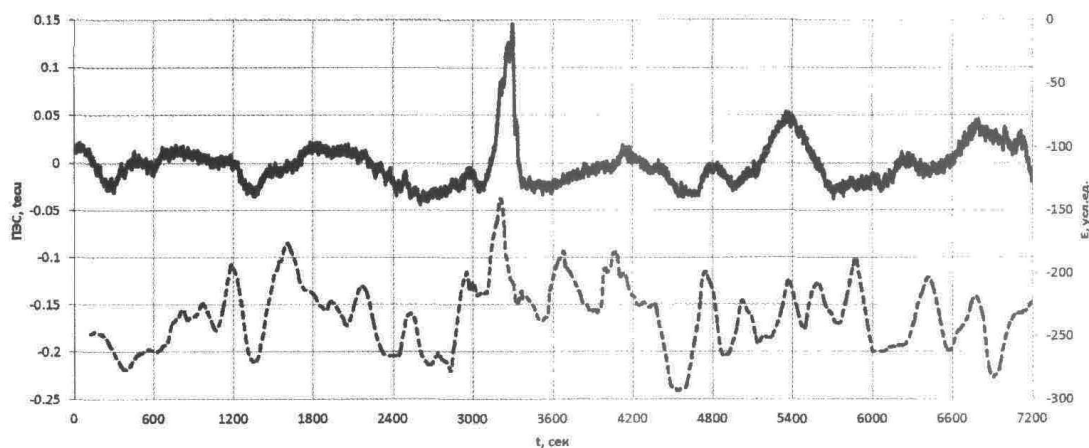


Рис. 7. Вариации ПЭС (сплошная линия) и приземного электрического поля (пунктирная линия), зарегистрированные 17–18 июля 2010 г. По горизонтальной оси отложено время в секундах от 23:00 UT 17 июля.

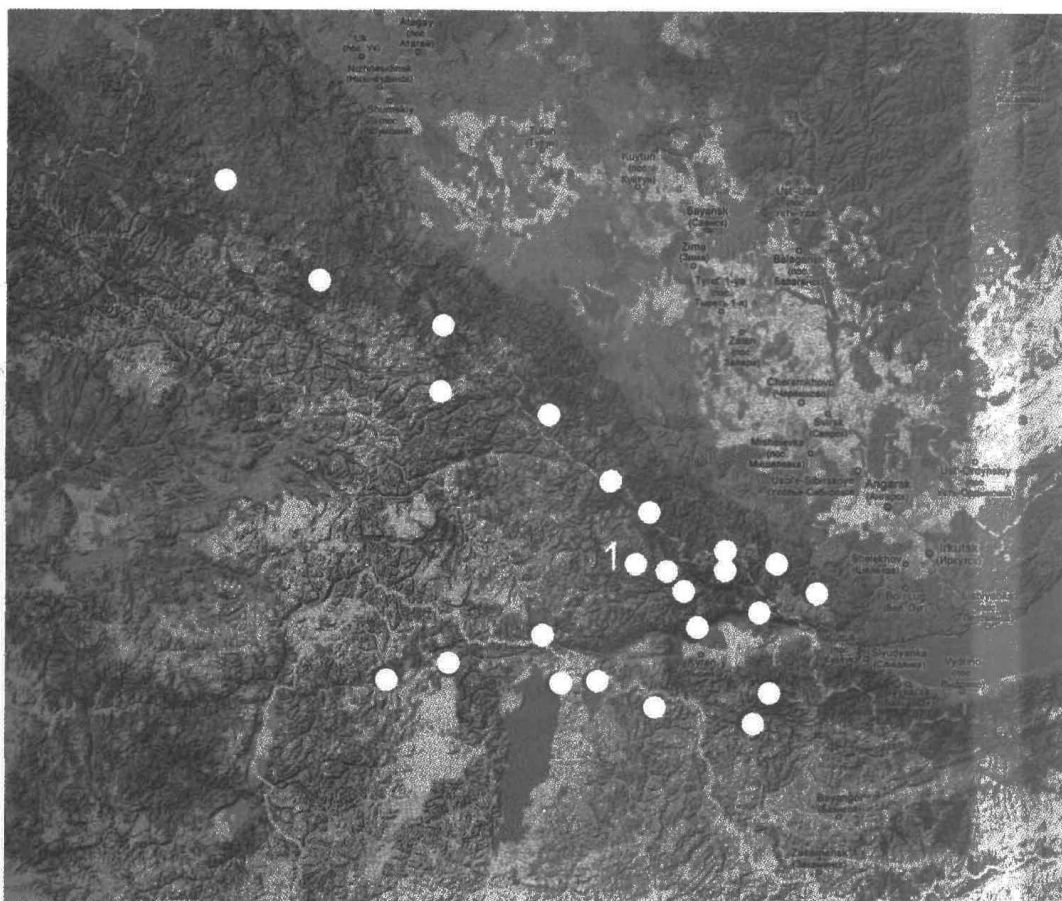


Рис. 8. Фрагмент карты юго-западной части БРЗ.
Значками показаны проекции ИТ, в которых были отмечены всплески ПЭС.

Предварительный анализ связи всплесков ПЭС ионосферы с возмущениями приземных электрического и магнитного полей, сейсмических колебаний, эманацій радона и акустических сигналов показал, что часть импульсов имеет характер вариаций, близкий к изменению приземного электрического поля. На рис. 7 показаны двухчасовые записи вариаций ПЭС над Тункинской долиной (проекция точки регистрации импульса ПЭС показана на рис. 8 цифрой один) и приземного электрического поля в пункте с координатами $51^{\circ}54'$ с.ш., $102^{\circ}20'$ в.д., зарегистрированные с 23 UT 17 июля по 01 UT 18 июля 2010 г. Кривые имеют близкую форму, что может свидетельствовать о едином источнике этих возмущений.

Заключение

Так как задачей проекта является поиск экспериментальных подтверждений взаимосвязи физических полей в ЛИС, основное внимание уделялось обнаружению коррелирующих возмущений на поверхности Земли и в ионосфере.

Наиболее интересным и продемонстрировавшим очевидную связь зарегистрированных ионосферных сигналов с геолого-тектоническими структурами является-

ся обнаружение всплесков ПЭС, проекции точек регистрации которых сконцентрированы на основных разломах Тункинской долины. В ряде случаев удалось сопоставить вариации приземного электрического поля с ионосферными всплесками. Показанный на рис. 7 пример синхронных вариаций ПЭС ионосферной напряженности приземного электрического поля, демонстрируют сходство вероятную взаимосвязь этих событий. Отметим, что такое же явление – корреляция возмущений приземного атмосферного тока с изменением электронной плотности в F-слое ионосферы было обнаружено при среднеширотных измерениях в обсерватории «Михнево» под Москвой [1]. Так как локальные изменения пространственно-временного распределения плотности ионосферы связаны соответствующим изменением ионосферного электрического поля, наблюдение синхронных вариаций приземного электрического поля и ПЭС может рассматриваться как проявление взаимосвязанных событий в глобальной электрической цепи.

Совокупность полученных результатов не позволяет однозначно связать все обнаруженные ионосферные возмущения с литосферными источниками. В то же время, выявленные в ходе двух экспедиций особенности изменения ионосферных параметров над юго-западной частью БРЗ, могут служить основанием для организации долгосрочных согласованных экспериментальных исследований с использованием аппаратуры наземного и космического базирования.

Работа выполнена при поддержке Программы № 4 Президиума РАН и грантов 09-05-10004 и 10-05-10048 Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И. и др. Экспериментальные исследования механизма передачи высокоширотных геофизических возмущений на средние широты / Геофизика межгеосферных взаимодействий: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 317–322.
2. Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Наблюдение низкочастотных колебаний электрического поля в ионосфере над разломами земной коры // Доклады АН, 2008, т. 420, № 1, С. 116–119.
3. Parrot M. The micro-satellite DEMETER // Journal of Geodynamics, 33, 535–545, 2002.
4. Parrot M., Sauvaud J.A., Berthelier J.J., Lebreton J.P. (2007). First in-situ observations of strong ionospheric perturbations generated by a powerful VLF ground-based transmitter // Geophys. Res. Lett., 34, L11111, doi:10.1029/2007GL029368.
5. Tatsuo O., Parrot M., Berthelier J.-J. (2011). The DEMETER mission, recent investigations on ionospheric effects associated with man-made activities and seismic phenomena // Space Weather, 9, W03101, doi:10.1029/2010SW001409.