

СИНХРОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ОНЧ ДИАПАЗОНА НАЗЕМНЫМИ И СПУТНИКОВЫМИ СРЕДСТВАМИ

*Б.Г. Гаврилов¹, Ю.И. Зецер¹, С.И. Климов²,
Ю.В. Поклад¹, И.А. Ряховский¹*

¹Институт динамики геосфер РАН,

²Институт космических исследований РАН

Электромагнитное излучение ОНЧ диапазона распространяется в волноводе Земля-ионосфера. Результаты многих спутниковых измерений показывают, что при определенных условиях часть энергии волны может проникать сквозь стенку волновода в верхние слои ионосферы. В статье представлены результаты синхронных измерений сигналов радиотехнической системы дальней навигации «Альфа» наземной аппаратурой Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН и бортовой аппаратурой микроспутника "Чибиc-М" ИКИ РАН, позволяющие идентифицировать и анализировать параметры отдельных сигналов наземных передатчиков.

Введение

При исследовании физических процессов, связанных с взаимодействием геосфер, значительное внимание уделяется поиску связанных возмущений в литосферно-атмосферно-ионосферной системе и определению механизмов этой взаимосвязи. Одним из важных приложений таких исследований является регистрация возмущений ионосферных параметров, связанных с процессами, происходящими на поверхности Земли.

Неоднократно сообщалось [см., например, Липеровский и др., 1992; Гохберг и др., 1983], что ионосферные возмущения (вариации электрических и магнитных полей, плотности заряженной и нейтральной компоненты, возникновение или изменение параметров потоков захваченных и высыпающихся частиц) связаны с определенными процессами в литосфере, хотя механизм наблюдаемых эффектов не имеет общепринятого объяснения. Электромагнитные возмущения в ионосфере, наблюдаемые при пролетах спутников над разломами и рифтовыми зонами во время землетрясений или на этапе их подготовки, были обнаружены около 30 лет назад [Мигулин и др., 1982; Гершензон и др., 1983; Ларкина и др., 2009]. При пролете спутника «Интеркосмос-19» над глубинными разломами (Норвежским Балтийским, Баренцевом и Карским морями) были обнаружены всплески интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений в диапазоне частот 0,1–20 кГц.

Условия прохождения электромагнитных сигналов типа сфериков в ионосферу исследовались многими авторами. В работах [Parrot et al., 2008; Liao et al., 1989; Woodman et al., 1984; Parrot et al., 1991] обсуждается связь интенсивности КНЧ-ОНЧ сигналов в ионосфере с возможным влиянием электромагнитного излучения мощных радиостанций и линий электропередач. Показано, что электромагнитное излучение молний может проникать в верхнюю ионосферу через зону, модифицированную излучением самого молниевых разряда.

В [Ляхов и др., 2008] показано, что возмущения электрического поля в ионосфере, зафиксированные спутником DE-2, связаны с геолого-тектоническими структурами и преимущественным распространением электромагнитных волн именно над данными областями. В [Гаврилов и др., 2012] представлены результаты синхронных измерений на Земле и на борту спутника Demeter всплесков магнитного поля, связанных с распространением электромагнитных ОНЧ возмущений. В экспериментах, проводившихся в Байкальской рифтовой зоне, было показано, что существует область их преимущественного распространения из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу.

В работах [Molchanov et al., 2006; Gufeld et al., 1992; Hayakawa et al., 1996] показано влияние землетрясений на параметры КНЧ-ОНЧ сигналов, зарегистрированных аппаратурой спутника Demeter. Для анализа влияния сейсмических событий на параметры распространения НЧ радиоизлучения исследуется изменение соотношения сигнал – шум в диапазоне частот работающих наземных передатчиков в режиме накопления за длительный период наблюдений. Результаты таких измерений не позволяют обеспечить надежную географическую привязку спутниковых данных.

Проведение экспериментов по синхронной регистрации сигналов радиотехнической системы дальней навигации «Альфа» в ГФО «Михнево» и микроспутником "Чиби́с-М" имело целью исследовать отдельные сигналы кГц диапазона. Возможность детального анализа их параметров существенно повышает временное разрешение и достоверность измерительной информации.

Постановка эксперимента

В 2013 году Институтом динамики геосфер РАН и Институтом космических исследований РАН проводился эксперимент по синхронной наземной и орбитальной регистрации электромагнитных сигналов ОНЧ диапазона.

Наземные измерения проводились в ГФО «Михнево» (54°57'25.92". 37°45'22.68"). Регистрация проводилась в полосе частот от 800 Гц до 30 кГц магнитометрическим комплексом «Плутон» с антеннами, имеющими чувствительность 0,4–0,5 фТл/Гц. Частота оцифровки сигнала составляла 65536 Гц и осуществлялась с помощью десятиканального двадцати четырех разрядного регистратора ADU-07 фирмы Metronix. Временная привязка обеспечивалась посредством GPS приемника с точностью 30 нс. Оси антенн ориентировались в направлении магнитный Север-Юг (канал Нх), Запад-Восток (канал Ну). Запись велась непрерывно.

Орбитальные измерения осуществлялись на микроспутнике "Чиби́с-М", высота орбиты которого составляла 450 км. В состав спутникового оборудования входили высокочувствительные датчики электрических и магнитных полей [Зеленый и др., 2014]. Во время пролета микроспутника на минимальном расстоянии от наземного измерительного комплекса на нем включался специальный режим, позволяющий получать записи электрических и магнитных полей с частотой оцифровки 78125 Гц. В работе использованы результаты записи бортовой аппаратурой напряженности электрического поля.

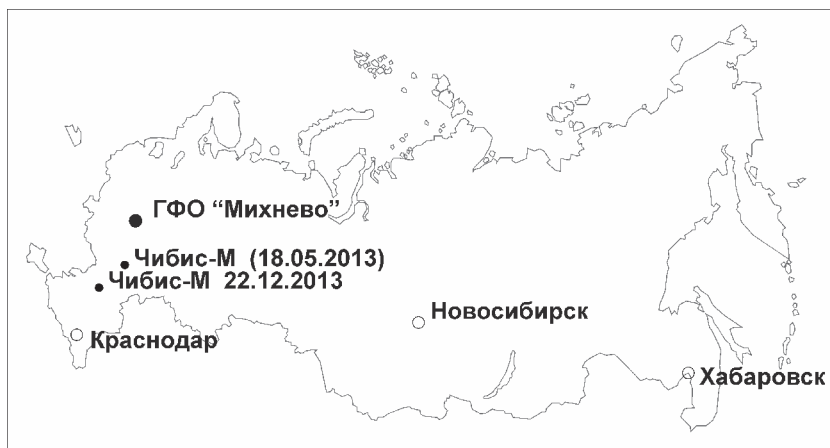


Рис. 1. Положение ГФО «Михнево» и микроспутника «Чиби́с-М» 18 июня и 22 декабря 2013 г. относительно передатчиков системы «А́льфа»

Результаты

В качестве источника электромагнитного излучения при проведении эксперимента были использованы сигналы радионавигационной системы "А́льфа". Система работает циклами длительностью 3,6 секунды. В течение каждого цикла 3 станции, расположенные в Краснодаре, Новосибирске и Хабаровске, излучают на частотах 11905, 12649 и 14881 Гц монохроматические сигналы длительностью 0,4 секунды. В период проведения эксперимента синхронную регистрацию сигналов удалось провести 18 июня и 22 декабря 2013 г. 18 июня во время пролета на расстоянии порядка 350 км на юг от ГФО "Михнево" (рис. 1) аппаратурой спутника "Чиби́с-М" была проведена регистрация напряженности электрического поля E . Длительность записи с частотой оцифровки 78125 Гц составила 36.6739 секунды. В момент времени 22:55:25.606816 UT спутник находился в точке с координатами 51.8571° с.ш. и 36.9548° в.д., а в момент окончания записи - в точке с координатами 51.9409° с.ш. и 40.7222° в.д.

На рис. 2 приведены спектры сигналов, принятых на спутнике и в ГФО «Михнево» по каналам N_x и N_y . Горизонтальные линии на рисунках – сигналы радионавигационной системы "А́льфа", зарегистрированные наземной и спутниковой аппаратурой на частотах 11905 и 12649 Гц. Сигнал на частоте 14881 Гц зарегистрирован только наземной аппаратурой. 22 декабря в 23:38 UT спутник находился в точке с координатами $50,63^\circ$ с.ш., $36,133^\circ$ в.д. Наземные измерения проводились с использованием той же аппаратуры, что и 18.06.2013. Результаты измерений показаны на рис. 3.

Обсуждение

В ходе синхронных наземных и орбитальных измерений электромагнитных сигналов ОНЧ диапазона удалось одновременно зарегистрировать сигналы навигационной системы «А́льфа» на поверхности Земли и на «Чиби́с-М». В период

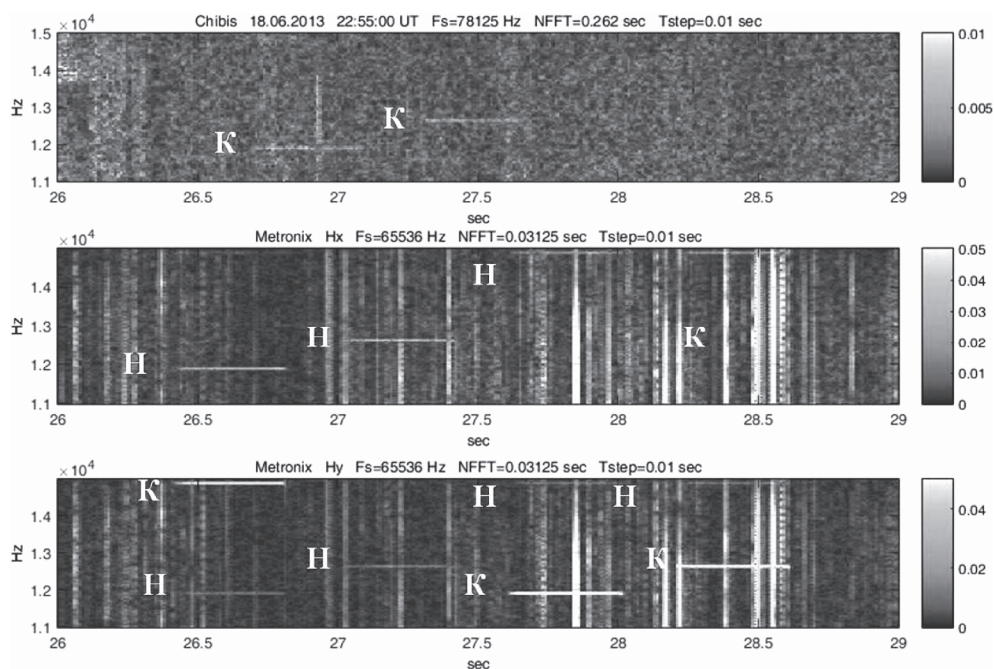


Рис. 2. Спектрограммы сигналов, зарегистрированных 18 июня 2013 г. аппаратурой микроспутника «Чиби́с-М» (верхняя панель) и ГФО «Михнево» (две нижние панели). По оси абсцисс время в секундах, начиная с 22:55:26 UT по оси ординат частоты в Гц. Цветом показана амплитуда принятых сигналов. Значения частоты оцифровки, длины выборки и шага по времени показаны над каждой панелью. Буквами **К** и **Н** обозначены сигналы от Краснодарского и Новосибирского передатчиков

регистрации расстояние от ГФО «Михнево» до микроспутника «Чиби́с» составляло от 350 до 500 км, до передатчиков в Краснодаре, Новосибирске и Хабаровске - 1060, 2900 и 6150 км соответственно. Спутник «Чиби́с» был удален от тех же передатчиков на расстояния порядка 650, 3100 и 6700 км.

Геофизическая обстановка в течение обоих сеансов регистрации была спокойной. По данным магнитных измерений в ГФО «Михнево» значение стационарного индекса геомагнитной активности не превышало 1 (рис. 4) и состояние ионосферы не должно было оказывать влияние на результаты измерений.

Циклограмма работы передатчиков системы «А́льфа» известна, что позволяет определить в какой момент времени и на какой частоте работал тот или иной передатчик. Кроме того, наземный магнитометр, обеспечивающий измерения по двум горизонтальным компонентам, позволяет идентифицировать сигналы передатчиков не только по их амплитуде, которая зависит от расстояния до источника сигнала, но и по поляризации сигнала. На рисунках 2 и 3 буквами К, Н и Х обозначены сигналы, принятые от передатчиков Краснодар, Новосибирск и Хабаровск соответственно. Результаты наземных измерений показывают, что амплитуда сигналов, зарегистрированных по северо-южной компоненте H_x , имеет наибольшую величину для передатчиков, расположенных на востоке страны – Ново-

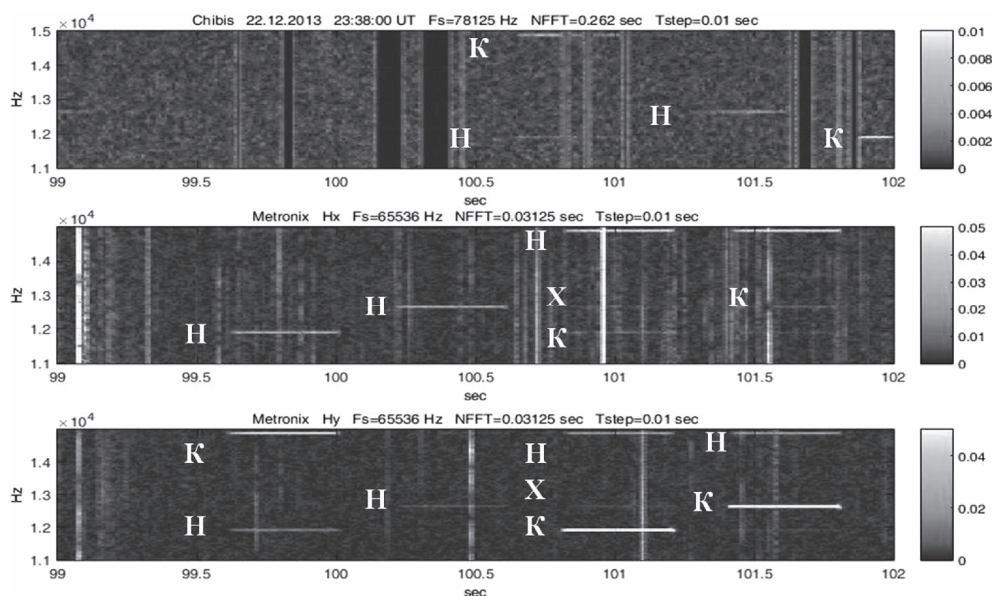


Рис. 3. Результат регистрации 22 декабря 2013 г. в 23:38:00 UT. Спектрограмма сигналов, зарегистрированного аппаратурой «Чибис-М» (верхняя панель). Спектрограммы сигналов, зарегистрированных в ГФО «Михнево» (средняя и нижняя панели). Буквами **К Н** и **Х** обозначены сигналы от Краснодарского, Новосибирского и Хабаровского передатчиков соответственно

сибирск и Хабаровск, а амплитуда сигналов, зарегистрированных по восточно-западной компоненте H_u , максимална для расположенного на юге Краснодарского передатчика.

Измеритель электрического поля на «Чибис-М» зарегистрировал 18.06.2013 г. только сигналы Краснодарского передатчика. Надежная идентификация этого сигнала стала возможна благодаря регистрации наземной и спутниковой аппаратурой мощного вистлера одновременно с сигналом передатчика. Подобным образом идентифицированы сигналы, зарегистрированные на «Чибис-М» 22.12.2013 г. В этот день кроме Краснодарского спутником были зарегистрированы сигналы Новосибирского передатчика.

Выводы

Использование сигналов навигационной системы «Альфа» для одновременной регистрации электромагнитного излучения на поверхности Земли и в космосе позволяет идентифицировать принятые сигналы даже при отсутствии надежной синхронизации спутниковой и наземной аппаратуры.

Использованная в эксперименте методика совместной обработки результатов наземных и космических наблюдений позволяет анализировать полученную измерительную информацию с высоким временным разрешением, что обеспечивает точную привязку времени регистрации сигнала с положением спутника и

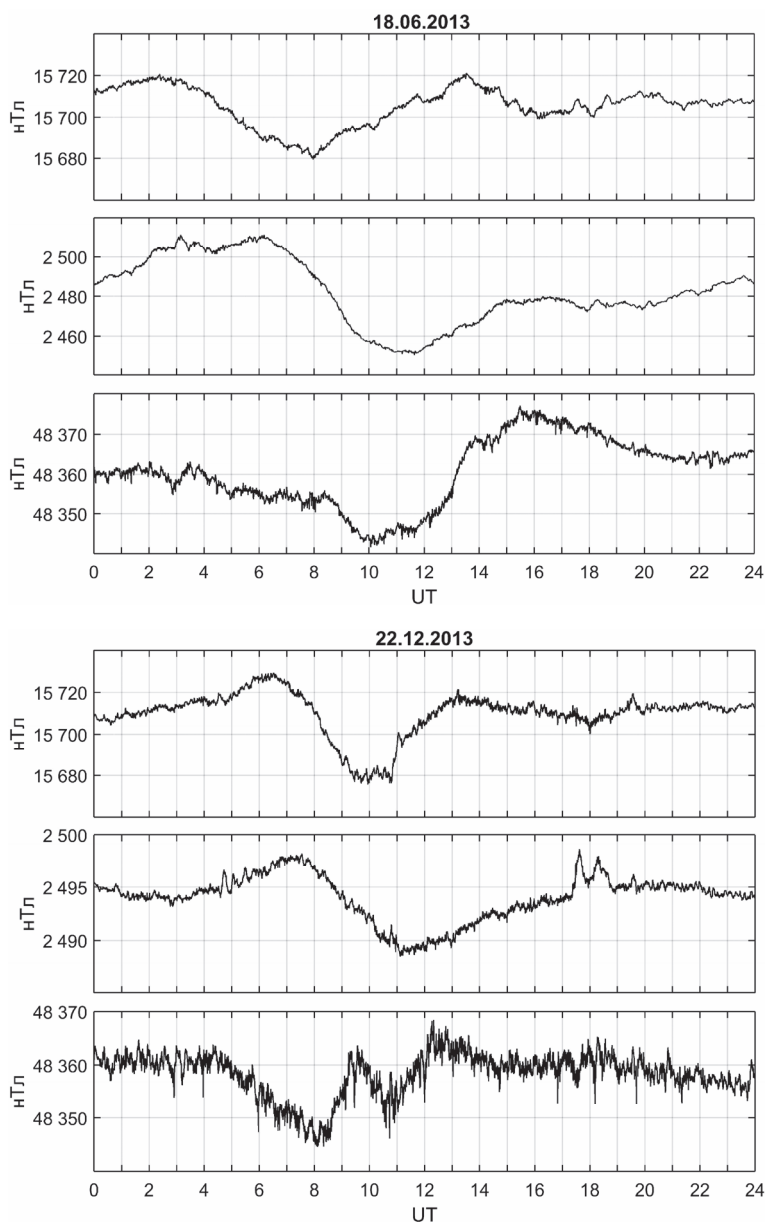


Рис. 4. Вариации геомагнитного поля в ГФО «Михнево» 18 июня (верхняя панель) и 22 декабря 2013 года (нижняя панель)

получение надежных данных о связи проникновения сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона в ионосферу с природными и антропогенными возмущениями.

Литература

- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Куркин В.И., Маркович И.Э., Поклад Ю.В., Парро М., Ряховский И.А., Яким В.В. Вариации электромагнитных полей и параметров ионосферы в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 2012. № 4. С. 72–80.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли. 1983. Т. 10. С. 17–21.
- Зелёный Л.М., Гуревич А.В., Климов С.И. и др. Академический микроспутник ЧИБИС-М // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 1. С. 1–13.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
- 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.
- Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., Tyumensev S.N. et al. Radiowave disturbances in period to Rudber and Rachinsk earthquakes // Phys. Solid Earth. 1992. V. 28 (3). P. 267–270.
- Hayakawa M. VLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associated with Earthquakes // Sensors. 2007. No. 7. P. 1141–1158.
- Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on subionospheric VLF signals // J. Comm. Res. Lab. 1996. V. 43. P. 169–180.
- Henderson T., Sonwalkar V., Helliwell R., Inan U., Fraser-Smith A. A search for ELF/VLF Emissions Induced by Earthquakes as Observed in the Ionosphere by the DE 2 Satellite // J. Geophys. Res. 1993. V. 98(A6). P. 9503–9514.
- Molchanov O., Rozhnoi A., Solovieva M. et al. Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. V. 6. P. 745–753.
- Němec F., Santolík O., Parrot M. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A04303. doi:10.1029/2008JA013972.
- Parrot M. The micro-satellite DEMETER // Journal of Geodynamics. 2002. V. 33. P. 535–541.
- Parrot M., Sauvaud J.A., Berthelier J.J., Lebreton J.P. First in-situ observations of strong ionospheric perturbations generated by a powerful VLF ground-based transmitter // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 34. L11111, doi:10.1029/2007GL029368.
- Onishi T., Parrot M., Berthelier J.-J. The DEMETER mission, recent investigations on ionospheric effects associated with man-made activities and seismic phenomena // Comptes Rendus Physique. Elsevier Masson. 2011. V. 12 (2). P. 160–170. doi:10.1016/j.crhy.2010.11.009.