

Вариации параметров сигналов радионавигационных станций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот

Р.Р. Каримов¹, В.И. Козлов¹, А.А. Корсаков¹, В.А. Муллаяров¹, В.П. Мельчинов²

¹ *Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН*
677980, Якутск, Ленина, 31

E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru

² *Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет*
им. М.К. Амосова

677000, Якутск, Белинского, 58

Приведена методика выделения амплитуды и фазы радионавигационных сигналов системы РСДН-20, по которой в Якутске в непрерывном режиме ведется регистрация. Получены устойчивые суточные и сезонные хода амплитуды и фазы. Сезонные вариации амплитуды в дневных условиях наиболее выражены, что связывается с повышением эффективности ионизации области Д ионосферы от декабря к июню. В сезонных дневных вариациях амплитуды и фазы наблюдается асимметрия, проявляющаяся в том, что средние значения указанных параметров в период осеннего равноденствия ближе совпадают с летним солнцестоянием, а параметра весеннего равноденствия ближе к периоду зимнего солнцестояния. При сопоставлении среднемесячного суточного хода амплитуды ОНЧ-шума и сигналов радиостанций оценена вариация интенсивности источника грозовой активности в Сибири в летний период. Указанная вариация в максимуме (июль, 03:00–12:00 UT) составляет 3,2 раза.

Ключевые слова: ионосфера, слои Д и Е, гроза, радишум, распространение радиоволн.

Введение

Одним из способов дистанционного зондирования состояния нижних слоев ионосферы (Д и Е) является регистрация вариаций параметров сигналов радионавигационных станций в диапазоне очень низких частот (ОНЧ: 3...30 кГц). Электромагнитные сигналы, указанного диапазона, способны распространяться на большие расстояния в волноводе Земля – ионосфера со слабым затуханием. Геофизические процессы воздействуют на параметры природных источников радиоизлучения ОНЧ и на условия распространения этих сигналов. Наибольший вклад в естественное радиоизлучение вносят грозовые разряды (Муллаяров и др., 1997). Одновременная регистрация сигналов естественных источников и радиостанций на сходных трассах распространения может прояснить вопрос о соотношении влияния геофизических процессов на параметры источников и трассы. Геофизические проявления выделяются по изменениям не только амплитуды, но и фазы сигналов, наиболее чувствительного параметра (Каримов и др., 2008). Чувствительность ОНЧ-радиоволн к различным геофизическим явлениям зависит от географического расположения излучателя и приёмника, направления (относительно магнитного поля Земли) распространения сигнала, его частоты, протяжённости трассы. Исследования, использующие этот метод, в силу технической сложности проводились в ограниченном объёме, и не теряют актуальность в настоящее время.

Нами разработана методика выделения амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов радиостанций, используя в качестве эталонного источника частоты синхронизованный сигнал от GPS-часов (Козлов и др., 2007), проанализированы суточные и сезонные вариации указанных параметров по данным непрерывной регистрации в городе Якутске с 2009 по 2011 гг. Устойчивые вариации фазы сигналов указывают на изменения высоты волновода Земля – ионосфера (при изменении затенённости трассы), а вариации амплитуды — на изменения электронной концентрации нижней ионосферы (при изменении эффективности ионизации области Д ионосферы), следствием чего является изменение коэффициента затухания радиоволн при распространении.

Оценена вариация интенсивности источника грозовой активности в Сибири путём сопоставления среднемесячного суточного хода амплитуды ОНЧ-шума и сигналов радиостанций в летний период.

Методика регистрации

В городе Якутске с 2009 г. по настоящее время в непрерывном режиме ведётся регистрация сигналов станций радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20), расположенных вблизи Новосибирска и Хабаровска. В промежутках между импульсами радионавигационных сигналов на тех же частотах регистрируется радишум. Сигнал принимается на электрическую штыревую антенну высотой 4 м, далее, после предварительного усиления (коэффициент усиления 40), поступает на вход 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (USB 3000). Привязка к абсолютному времени и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и запуска сбора данных в соответствии с режимом работы РСДН-20 организованы при помощи GPS-часов (Trimble Thunderbolt). В сравнении с рубидиевым стандартом частоты GPS-часы имеют ряд преимуществ: более широкий температурный диапазон, длительный срок службы и значительно меньшую цену. В часах используется как долговременная (по сигналам спутников GPS), так и короткопериодическая (от качественного кварцевого генератора) стабилизации. Точность секундного импульса (PPS) составляет $UTC \pm 50$ нс, а гармонического сигнала (10 МГц) — $1,16 \cdot 10^{-12}$ после суток работы (три сигма). Внешняя частота дискретизации 2,5 МГц для АЦП получается делением синхронизированного гармонического сигнала GPS-часов (10 МГц) переходным устройством GPS2500, изготовленным Научно-производственной группой R-Technology. Оцифрованный сигнал подаётся на ноутбук с программой регистрации, разработанной в лаборатории Радиоизлучений ионосферы и магнитосферы ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН. Данная программа осуществляет выделение (с помощью решётчатых функций преобразования Фурье) амплитуды и фазы на трёх частотах сигналов РСДН-20 и запись данных на диск. Длительность «окна» выборки (2,688 мс) подбиралась так, чтобы, с одной стороны, в ней укладывалось целое число периодов для каждой частоты, а с другой — определяла необходимое частотное разрешение. Предварительно формируется табличный массив значений тригонометрических функций для быстрого преобразования Фурье, который используется во время регистрации, что существенно ускоряет процесс расчёта. В сформированном «окне» вычисляются амплитуда и фаза для трёх частот, далее полученные значения усредняются в каждой записи отдельно для каждой частоты. Размер окна составляет 40 периодов для частоты 14,88 кГц, 34 периода для 12,649 кГц и 32 периода для 11,904 кГц, что соответствует кратности частот исследуемых сигналов, и позволяет избавиться от наложения импульсов разной частоты друг на друга во время анализа Фурье.

Данные и анализ

Регистрация радиосигналов по описанной выше методике позволили выделить устойчивые суточные и сезонные вариации их параметров. На рис. 1 представлены вариации медианных средних значений амплитуды и фазы сигналов новосибирской и хабаровской радиостанций на частоте 14,88 кГц. Суточное увеличение амплитуды сигнала новосибирской станции на частоте 14,88 кГц для декабря составляет 6 раз, для июня — 1,8 раза, для марта — 4,5 раза и для сентября — 2,2 раза. Суточная вариация фазы указанного сигнала: декабрь — 130° , июнь — 50° , март — 140° и сентябрь — 190° . Аналогичен суточный ход для сигнала новосибирской станции, излучающей на частоте 11,9 кГц. Суточное увеличение амплитуды:

декабрь — 4,3 раза, июнь — 1,45 раза, март — 5,5 раза, сентябрь — 2,33 раза. Вариация фазы за сутки: декабрь — 70°, июнь — 60°, март — 70°, сентябрь — 100°.

Суточная вариация амплитуды сигнала на частоте 14,88 кГц хабаровской радиостанции: декабрь — 6 раз, июнь — 1,9 раза, март — 4,9 раза, сентябрь — 2,8 раза. Суточная вариация фазы: декабрь — 52°, июнь — 50°, март — 65°, сентябрь — 65°. Аналогично для вариаций сигнала на частоте 11,9 кГц. Увеличение амплитуды в течение суток: декабрь — 4,7 раза, июнь — 1,9 раза, март — 4,4 раза и сентябрь — 2,1 раза. Суточная вариация фазы: декабрь — 20°, июнь — 23°, март — 20°, сентябрь — 40°.

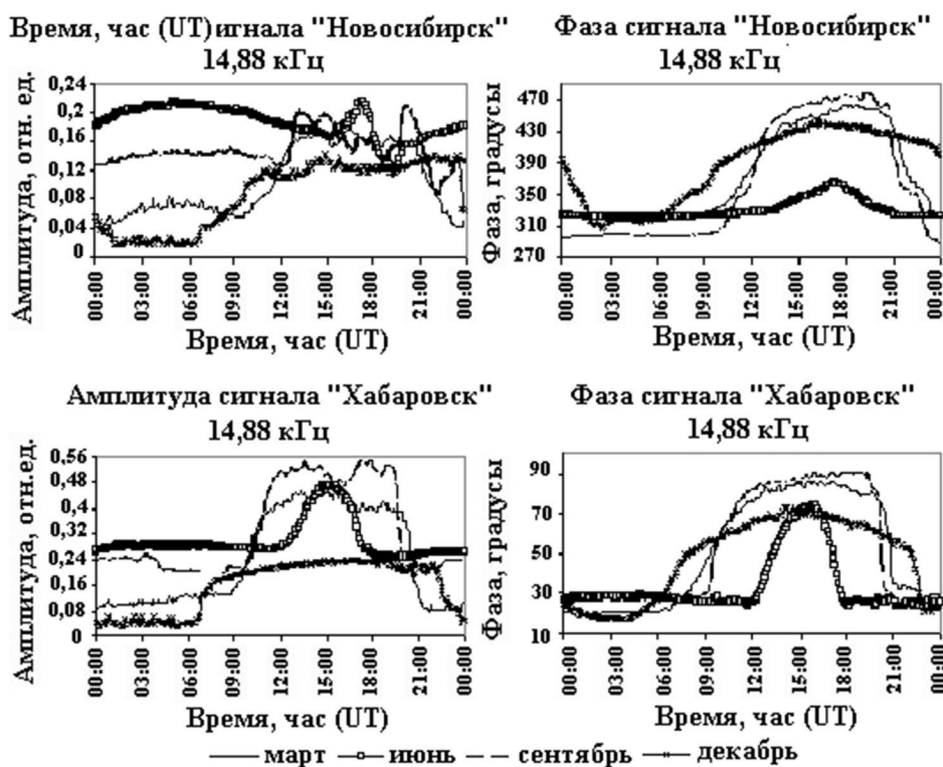


Рис. 1. Вариации медианных средних значений амплитуды и фазы сигналов новосибирской и хабаровской радиостанций

Сезонные хода оценивались относительно величины и фазы сигнала, принимаемого в декабре для дневных и ночных условий на трассах распространения. Увеличение амплитуды новосибирского радиосигнала для дневных условий (04:00 UT): июнь — в 8,2 раза, март — в 2,8 раза, сентябрь — в 5,6 раза. Изменение фазы сигнала (04:00 UT): июнь, март (14,88 кГц) — менее 1°, июнь и март (11,9 кГц) — 10°, сентябрь — 20°. Для ночных условий (17:00 UT) увеличение амплитуды: июнь (14,88 кГц) — в 1,75 раза, июнь (11,9 кГц) — в 2,75 раза, март (14,88 кГц) — в 1,33 раза, март (11,9 кГц) — в 1,78 раза, сентябрь (14,88 кГц) — в 1,33 раза, сентябрь (11,9 кГц) — в 2,8 раза. Изменение фазы сигнала (17:00 UT): июнь (14,88 кГц) — 80°, июнь, март и сентябрь (11,9 кГц) — менее 1°, март (14,88 кГц) — 19°, сентябрь (14,88 кГц) — 31°.

Сезонные увеличения амплитуды хабаровской РНС для дневных условий (03:00 UT): июнь (14,88 кГц) — в 5,83 раза, июнь (11,9 кГц) — в 7,14 раза, март (14,88 кГц) — в 2,17 раза, март (11,9 кГц) — в 2,57 раза, сентябрь (14,88 кГц) — в 5,13 раза, сентябрь (11,9 кГц) — в 6,57 раза. Изменения фазы хабаровской РНС (03:00 UT): июнь (14,88 кГц) — 10°, июнь (11,9 кГц) — менее 1°, март — 3°, сентябрь — 10°. Сезонные возрастания амплитуды для ночных условий (15:00 UT): июнь — в 2 раза, март — в 1,95 раза, сентябрь — в 2,2 раза. Изменения фазы (15:00 UT): июнь (14,88 кГц) — менее 1°, июнь (11,9 кГц) — 8°, март — 15°, сентябрь — 15°.

Вариации фазы ОНЧ сигналов характеризуют, в основном, изменение высоты волновода Земля — ионосфера на соответствующих трассах распространения радиоволн и соответствующего изменения величины пути сигнала при его отражениях от нижнего слоя ионосферы, а вариации амплитуды, в основном, — изменение коэффициента затухания. Сезонные вариации в дневных условиях наиболее выражены, что связано с повышением эффективности ионизации области Д ионосферы от декабря к июню, в частности уменьшению зенитного угла Солнца над трассой распространения сигнала, следствием чего является повышение градиента электронной концентрации нижней ионосферы и уменьшение коэффициента затухания радиоволн рассматриваемого диапазона. В сезонных дневных вариациях амплитуды и фазы наблюдается асимметрия, проявляющаяся в том, что средние значения указанных параметров в период осеннего равноденствия (сентябрь) ближе совпадают с летним солнцестоянием, а параметра весеннего равноденствия ближе к периоду зимнего солнцестояния. Указанная асимметрия выражена ярче при распространении сигнала с направления Хабаровск – Якутск (при распространении по долготе) и хорошо согласуется с сезонной асимметрией профилей электронной концентрации области Д, указанной в (Альперт, 1972).

Представленная на рис. 2 суточная вариация амплитуды ОНЧ шума (относительно уровня в 02:00 UT) на частоте 14,88 кГц составляет: март — 4,4 раза, июнь — 2,5 раза, сентябрь — 2,5 раза и декабрь — 4,6 раза. Основными источниками регистрируемого в Сибири ОНЧ-радишума в летний период являются два ближайших мощных грозовых очага, существующих постоянно. Первый очаг расположен на территории Западносибирской равнины. Второй очаг протянулся по меридиану от южных отрогов Большого и Малого Хингана до севера Станового хребта, по параллели — с запада от Большого Хингана до южных отрогов Малого Хингана и Бурецкого хребта на востоке (Козлов и др., 2011). Максимальные значения амплитуды шума приходятся на июль, что соответствует максимуму местной (на территории Якутии) грозовой активности, поэтому следует учитывать и её влияние. Электромагнитные сигналы естественного происхождения (принимаемые в Якутске ОНЧ-шумы), источниками которых служат рассмотренные выше грозовые очаги, распространяются по сходным трассам, что и сигналы новосибирской и хабаровской радиостанций.

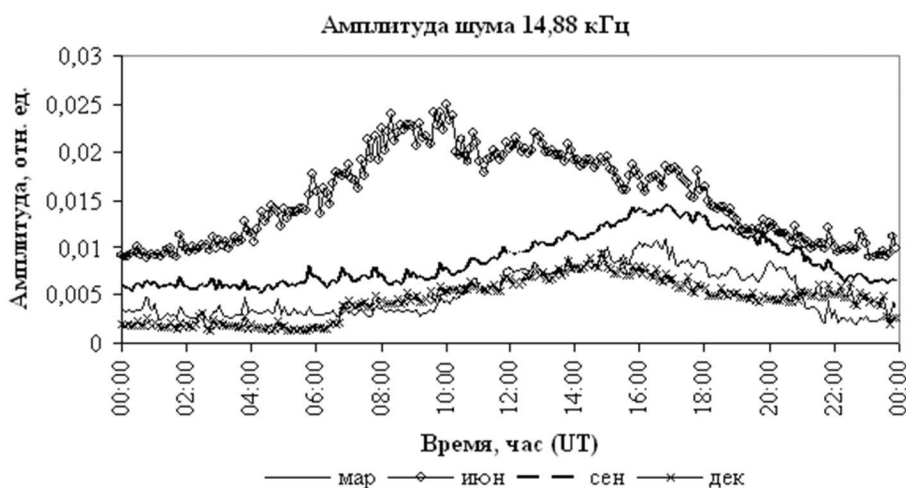


Рис. 2. Вариации медианных средних значений амплитуды радишума, регистрируемого на частоте 14,88 кГц

На рис. 3 сопоставлены вариации медианных средних (за месяц июль) амплитуд сигналов радиостанций и шума, регистрируемых в Якутске на частоте 14,88 кГц. Из рисунка видно, что вариация амплитуды шума с 03:00 до 12:00 UT (относительно значения в 02:00 UT) составляет 3,2 раза и соответствует изменению интенсивности источника, на что указывает отсутствие изменения амплитуды сигналов радиостанций и, следовательно, отсутствие

изменений в условиях распространения радиосигнала. Вариации амплитуды шума с 12:00 по 16:00 UT и с 16 по 20:00 UT составили 2,1 и 1,8 раза соответственно. Данные вариации близки к изменениям амплитуды в суточном ходе сигналов радиостанций: 2,3 раза для Хабаровска (12:00–18:00 UT) и 1,34 раза для Новосибирска (15:00–20:00 UT). Вариации амплитуды указывают на изменение в распространении, как шума, так и сигналов радиостанций. Действительно, рассмотренные временные интервалы соответствуют наступлению ночных условий на трассах Хабаровск – Якутск, Новосибирск – Якутск и на сходных им трассах распространения ОНЧ шума.

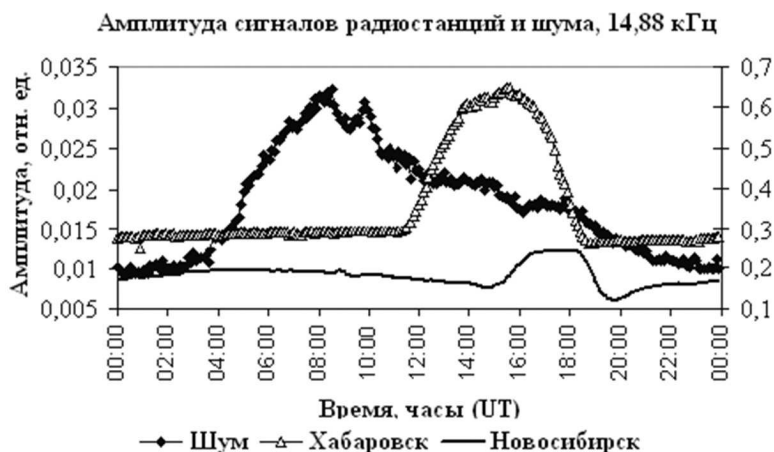


Рис. 3. Вариации медианных средних за шоль амплитуд сигналов новосибирской, хабаровской радиостанций и шума, регистрируемых на частоте 14,88 кГц

Заключение

Разработана методика выделения амплитуды и фазы радионавигационных сигналов системы РСДН-20, по которой в Якутске в непрерывном режиме ведется регистрация. Получены устойчивые суточные и сезонные хода амплитуды и фазы, которые показали ряд особенностей распространения радиосигнала в данном диапазоне. Сезонные вариации амплитуды в дневных условиях наиболее выражены, что связано с повышением эффективности ионизации области Д ионосферы от декабря к июню, в частности уменьшению зенитного угла Солнца над трассой распространения сигнала, следствием чего является повышение градиента электронной концентрации нижней ионосферы и уменьшение коэффициента затухания радиоволн рассматриваемого диапазона. В сезонных дневных вариациях амплитуды и фазы наблюдается асимметрия, проявляющаяся в том, что средние значения указанных параметров в период осеннего равноденствия (сентябрь) ближе совпадают с летним солнцестоянием, а параметра весеннего равноденствия ближе к периоду зимнего солнцестояния.

При сопоставлении среднемесячного суточного хода амплитуды ОНЧ-шума и сигналов радиостанций оценена вариация интенсивности источника грозовой активности в Сибири в летний период. Указанная вариация в максимуме (июль месяц, 03:00–12:00 UT) составляет 3,2 раза.

Литература

1. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. № 2. С. 250–254.

3. Козлов В.И., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А. Регистратор сигналов сверхдлинноволновых радиостанций с синхронизацией от GPS-часов // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 5. С. 153–154.
4. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р. Пространственное распределение плотности грозозарядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Вып. 8. Т. 3. С. 257–262.
5. Муллаяров В.А., Каримов Р.Р., Козлов В.И., Мурзаева Н.Н. Связь среднеширотного шумового ОНЧ-излучения с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрномия. 1997. Т. 37. № 6. С. 132–137.

Variations of very low frequency signal parameters of radio navigation stations, registered in Yakutsk

R.R. Karimov¹, V.I. Kozlov¹, A.A. Korsakov¹, V.A. Mullayarov¹, V.P. Melchinov²

¹ *Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
677980, Yakutsk, Lenina, 31
E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru*

² *Physical-technical Institute, M.K. Ammosov The North-Eastern Federal University
677000, Yakutsk, Belinskogo, 58*

The technique of separation of amplitude and phase of radio navigation system signals RSDN — 20 are presented, in which the city of Yakutsk in the continuous process of registering. Stable daily and seasonal course of the amplitude and phase are received. Seasonal variations in the amplitude of the daytime conditions are most pronounced, which is associated with an increase in the efficiency of ionization of the D layer ionosphere from December to June. In the seasonal diurnal variations of amplitude and phase of the observed asymmetry is manifested in the fact that the average values of these parameters during the autumnal equinox to close at the same time the summer solstice and the spring equinox, the parameter is closer to the period of the winter solstice. Comparing the average daily variation of the amplitude of VLF radio signals and the noise measured variation of the intensity of the source of thunderstorm activity in Siberia in the summer. The above variation of the maximum (July, 03:00–12:00 UT) is 3.2.

Keywords: ionosphere, D and E layers, thunderstorm, radio noise, radio wave propagation.