Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков РСДН-20 и интенсивности радиошумов (11.9 кГц), зарегистрированных в Якутске в 2009-2017 гг.

А. А. Корсаков¹, В. И. Козлов¹, Е. А. Павлов^{1,2}

¹ Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутский научный центр СО РАН, 677027, г. Якутск, просп. Ленина, 31

² Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

E-mail: korsakovaa@ikfia.ysn.ru

В работе проводится анализ суточных, сезонных и межгодовых вариаций интенсивности радиошума, а также амплитуды и фазы сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 по данным регистрации на частоте 11.904 кГц в г. Якутске в периоды нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности (2009-2017 годы). Наиболее ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды. Зарегистрировано увеличение фазовой задержки радиосигнала от дня к ночи, что характерно для увеличения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера. Наблюдаемое уменьшение фазовой задержки в ночное зимнее время на радиотрассе малой протяженности Хабаровск-Якутск возможно объясняется интерференцией мод высших порядков. Наблюдается асимметрия дневных сезонных вариаций амплитуды ОНЧ радиосигналов (11.904 кГц). Амплитуда сигнала в период осеннего равноденствия ближе к летнему солнцестоянию, а амплитуда весеннего равноденствия - к зимнему солнцестоянию. В дневные часы сезонные вариации амплитуды и фазы относительно стабильны год от года. В периоды нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности отмечены большие изменения амплитуды ОНЧ-сигнала, зарегистрированные зимой, по сравнению с летом. На фоне повышения солнечной активности в зимний период ночью регистрируется повышение фазовой задержки на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск-Якутск (1400 км) на $23 \pm 6^\circ$.

Ключевые слова: ОНЧ радиоволны, волновод Земля-ионосфера, радиошум.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-122-136

Поступила в редакцию: 20.10.2020

В окончательном варианте: 03.02.2021

Для цитирования. Корсаков А.А., Козлов В.И., Павлов Е.А. Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков РСДН-20 и интенсивности радиошумов (11.9 кГц), зарегистрированных в Якутске в 2009-2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 34. № 1. С. 122-136. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-122-136

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Корсаков А. А., Козлов В. И., Павлов Е. А., 2021

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту II.16.2.1 (номер госрегистрации №АААА-А17-117021450059-3) и частично при поддержке РФФИ №18-45-140028 p_a.

Введение

Ионизирующими излучениями для нижней ионосферы являются наиболее энергичная часть солнечного рентгеновского спектра (0.05 – 0.8 нм), интенсивная солнечная линия водорода Лайман- α (121.6 нм) и крайнее ультрафиолетовое излучение. Интенсивность потока ионизирующего излучения меняется в цикле солнечной активности. Прямые непрерывные исследования нижней ионосферы (область D: 60 – 90 км, область E: 90–130 км) и нейтральной атмосферы на прилегающих высотах мезосферы и нижней термосферы сложны и затратны [1, 2]. Один из методов дистанционного зондирования околоземного пространства основан на регистрации вариаций параметров радиосигналов низких (НЧ: 30 – 300 кГц) и очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц). Прием ОНЧ радиосигналов с целью мониторинга проводится с поверхности земли, с воздуха и из космоса [3, 4]. Радиоволны ОНЧ распространяются на большие расстояния в волноводе Земля – нижняя ионосфера с относительно малым затуханием 2–5 дБ/Мм [3]. ОНЧ радиоволны чувствительны к возмущениям, происходящим в нижней ионосфере вдоль трассы их распространения. Высота отражения от областей D и E связана с концентрацией электронов, а значит зависит как от источников ионизации, так и от динамических и химических процессов в атмосфере [5]. Продолжительная регистрация ОНЧ и НЧ радиоволн позволяет проводить исследования суточных, сезонных, межгодовых изменений параметров атмосферы [6, 7] на фоне смены 11-летних циклов солнечной активности, стратосферных потеплений, а также изменений климата [8, 9, 2].

В работе [10] отмечается, что вклад в формирование амплитудных и фазовых характеристик волноводных мод вносят разные по высоте области нижней ионосферы, ионизация которых может происходить под воздействием разных факторов. Ионизация нижних областей ионосферы, влияющих на вариации амплитуды принимаемых ОНЧ радиосигналов, происходит также под воздействием галактических космических лучей. Выше в области D ионосферы основным источником является ионизирующее излучение Солнца. Возможно даже разное влияние одного и того же геофизического фактора на вариации амплитуды и фазы. В работе [11] не выделено существенного влияния числа солнечных пятен в 21-м цикле солнечной активности на вариации фазы ОНЧ радиосигнала.

В работе [12] приводится 50-летний ряд наблюдений вариаций приведенной фазовой высоты (как характеристики высоты отражения от дневной нижней ионосферы) при регистрации радиосигналов в диапазоне НЧ. Указывается на понижение фазовой высоты во время солнечного максимума и наоборот. В работе отмечается понижение фазовой высоты зимой из-за повышенного образования свободных электронов в области D вследствие сильного переноса NO зимой из нижней термосферы путем остаточной циркуляции и последующей фотоионизации солнечным излучением линии Лайман- α (121,6 нм). Выделены влияние южной фазы колебаний Эль-Ниньо и квазидвухлетних колебаний, связанные со стратосферными и тропосферными процессами. В работе [13] показано, что эффекты южной фазы колебаний Эль-Ниньо, квазидвухлетних колебаний и циклов солнечной активности не обязательно являются аддитивными. Нелинейность является важным процессом в изменениях параметров нижней ионосферы.

Естественный ОНЧ радиосум состоит из флуктуационной и импульсной составляющих. Основной вклад в импульсный радиосум вносят радиоимпульсы

ближних грозových разрядов (атмосфериков). Флуктуационные радишумы - непрерывная случайная последовательность накладывающихся друг на друга импульсов дальних грозových разрядов, затухающих в волноводе Земля-ионосфера. Искусственными источниками ОНЧ радиоволн являются, в основном, радиопередатчики систем дальней навигации и точного времени [3]. Передатчики относительно длительно излучают сигналы с постоянными параметрами. Вариации амплитуды и фазы зарегистрированного радиосигнала дают информацию об изменениях параметров волновода, в основном определяемых его верхней стенкой — нижней ионосферой. Такой мониторинг может выполняться на разных временных и пространственных масштабах. Чувствительность ОНЧ радиоволн к различным геофизическим явлениям зависит от географического расположения излучателя и приемника, частоты радиосигнала, его направления распространения относительно магнитного поля Земли, протяженности радиотрассы [14]. Возможность определять состояние ионосферы с помощью этого метода и таким образом исследовать Солнечно-Земные связи определяет актуальность выбранного метода.

Целью данной работы является исследование факторов, влияющих на особенности распространения ОНЧ радиоволн в ионосферных условиях Северной Азии.

Поставлена задача: провести анализ суточных, сезонных и межгодовых вариаций интенсивности ОНЧ радишума (флуктуационной составляющей), а также амплитуды и фазы сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 по данным продолжительной регистрации на частоте 11.904 кГц в г. Якутске с 2009 по 2017 годы. Практически непрерывный ряд вариаций указанных параметров охватывает период нарастания, максимум, а также период спада в 24-м цикле солнечной активности.

Методика регистрации

С 2009 г. Институтом космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН) совместно с Физико-техническим институтом Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова (ФТИ СВФУ) в г. Якутске (62°1' N, 129°42' E) проводится регистрация сигналов радионавигационной системы дальней навигации РСДН-20 [15]. Передатчики РСДН-20 расположены вблизи городов Краснодар (45°24' N, 38°9' E), Новосибирск (55°45' N, 82°27' E) и Хабаровск (50°4' N, 136°36' E) и излучают радиоимпульсы на частотах 11.904, 12.649 и 14.881 кГц. Особенность нашей методики состоит в том, что на этих же частотах в период паузы между излучением радиоимпульсов проводится регистрация интенсивности радишума. Протяженность трасс распространения сигналов радиопередатчиков при регистрации в Якутске составляет: 1400 км (Хабаровск-Якутск), 2640 км (Новосибирск-Якутск), 5760 км (Краснодар-Якутск).

Для выделения сигнала применяется прямоугольное окно быстрого преобразования Фурье (БПФ). Длительность окна выборки составляет 2688 мкс, таким образом, ширина главного лепестка АЧХ по нулевому уровню: $\Delta F_0 = 2/2688 \text{ мкс} = 744.05 \text{ Гц}$, что определяет частотное разрешение. Длительность окна БПФ соответствует кратности частот исследуемых радиосигналов. Для определения

интенсивности радишума прямоугольному окну данной длительности соответствует эффективная полоса 334.8 Гц.

Предполагается, что интенсивность радишума в узкой полосе частот можно охарактеризовать медианным значением амплитуды спектральной составляющей. Для уменьшения вклада импульсной составляющей на каждом этапе применяется медианное усреднение значений. Первый этап – медианное усреднение (M_e) в каждой посылке пакета радиоимпульса (интервал 0.4 сек.), второй – медианное усреднение на интервале 3 минуты. Результат подобен применению алгоритмов детектирования с некоторым заданным плавающим минимальным порогом. Флуктуации оцениваются на основе квартилей 25% (Q_{w25}) и 75% (Q_{w75}): $M_e - Q_{w25}$ и $Q_{w75} - M_e$.

Для пересчета амплитуд из относительных единиц в единицы напряженности электрического поля проведена калибровка путем одновременных измерений амплитуды сигналов радиостанций РСДН-20 стационарным регистрирующим комплексом и мобильным приемником, в состав которого вошли сертифицированная дипольная антенна П6-51, АЦП Е14-440 и ноутбук с программным обеспечением «LGraPh2». Для частоты 11.904 кГц коэффициент преобразования антенны Кант составляет 16.88 дБ(1/м), для частоты 12.649 кГц: Кант = 16.64 дБ(1/м), для частоты 14.881 кГц: Кант = 15.9 дБ(1/м). Измерения мобильным комплексом выполнены в сельской местности в окрестностях г. Якутска (удаление 10 км), без застроек, излучающих систем и ЛЭП в радиусе 2 км. В данном случае основным источником ОНЧ радишума является атмосферный шум грозовых разрядов. Полевые измерения проводились в дневное время (03-05 UT). Усредненные коэффициенты пересчета 1 отн. ед. амплитудного значения стационарного регистратора к уровню у приемной антенны: 77.15 дБ(мкВср.кв./м) для частоты сигнала 11.904 кГц, 76 дБ(мкВср. кв./м) для 12.649 кГц и 74.81 дБ(мкВср.кв./м) для 14.881 кГц.

Экспериментальные данные и их анализ

Суточные амплитудно - фазовые вариации радиосигналов РСДН-20 (11.9 кГц), характеризующиеся медианными значениями, регистрируемыми в марте, июне, сентябре и декабре в Якутске в 2015 г. представлены на рис. 1.

В декабре дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала в волноводе Земля-ионосфера на радиотрассе Хабаровск-Якутск: с 01 (восход Солнца в Якутске) до 05:30 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение (Ср.кв.) амплитуды сигнала радиопередатчика Хабаровск в местный полдень (зенит) на середине радиотрассы: 53 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка составляет 501°. Ночные условия распространения в декабре на радиотрассе Хабаровск-Якутск: с 8 UT (заход Хабаровск) до 22:30 UT (восход в Хабаровске). Ср.кв. значение амплитуды сигнала радиопередатчика Хабаровск в местную полночь на середине радиотрассы в декабре: 61 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка составляет 485°. Как результат интерференции мод высших порядков в период прохождения границы «день-ночь» (заходного терминатора) вблизи 7:15 UT регистрируется максимум фазовой задержки: 510°. В период прохождения восходного терминатора в 17:30 UT также регистрируется минимум амплитуды сигнала Хабаровск: 61.8 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 22:45 UT – максимум фазовой задержки: 507°.

Рис. 1. Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 (11.9 кГц), зарегистрированные в Якутске в 2015 г.

В марте дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала на радиотрассе Хабаровск-Якутск: с 21:15 UT (восход в Якутске) до 09:10 UT (заход Хабаровск). Ср.кв. амплитуды сигнала Хабаровск в местный полдень на середине радиотрассы: 61.6 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 493°. Ночные условия распространения в марте (трасса Хабаровск-Якутск): с 09:30 UT (заход Якутск) до 21 UT (восход Хабаровск). Ср.кв. амплитуды сигнала радиопередатчика Хабаровск в местную полночь на середине радиотрассы: 64.3 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 500°. В период прохождения границы «день-ночь» в 10:30 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала Хабаровск: 59 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 9:47 и 10:20 UT регистрируется 2 максимума фазовой задержки: по 510°. При прохождении

восходного терминатора – спад амплитуды сигнала Хабаровск с перегибом, с максимумом в 20:51 UT: 61 дБ(мкВср.кв./м), регистрируются два максимума в фазовой задержке сигнала: 508°(20:21 UT) и 502°(21:15 UT). В июне дневные условия распространения сигнала на радиотрассе Хабаровск-Якутск: с 20 (восход Хабаровск) до 11 UT (заход Хабаровск). Ср.кв. амплитуды сигнала Хабаровск в местный полдень на середине радиотрассы: 65.4 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 492°. Ночные условия распространения сигнала в июне (трасса Хабаровск-Якутск): с 13 UT (заход Якутск) до 18 UT (восход в Якутске). Ср.кв. амплитуды сигнала Хабаровск в полночь на середине радиотрассы: 66.0 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 503°. В период прохождения границы «день - ночь» в 12:45 UT – минимум амплитуды сигнала: 62 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 13 UT - максимум фазовой задержки: 516°. В период прохождения восходного терминатора в 17:30 UT также регистрируется минимум амплитуды сигнала Хабаровск: 61.8 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 17:20 UT – максимум фазовой задержки: 515°. В сентябре дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала (трасса Хабаровск – Якутск): с 20:40 UT (восход Якутск) до 09:20 UT (заход Хабаровск). Ср.кв. амплитуды сигнала Хабаровск в полдень на середине радиотрассы: 63,6 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 487°. Ночные условия распространения в марте (трасса Хабаровск – Якутск): с 10 UT (заход Хабаровск) до 20:30 UT (восход Хабаровск). Ср.кв. амплитуды сигнала Хабаровск в местную полночь на середине радиотрассы: 67 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 507°. В период прохождения границы «день - ночь» в 11:09 UT - минимум амплитуды сигнала Хабаровск: 61.2 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 10:30 UT – максимум фазовой задержки: 518°. В период прохождения восходного терминатора в 19:39 UT – минимум амплитуды радиосигнала 61.8 дБ(мкВср.кв./м), затем в 20:15 UT – максимум амплитуды: 63.2 дБ(мкВср.кв./м), в фазовой задержке сигнала минимум: 487°(20:51 UT), а затем максимум: 493°(22:36 UT). Суточные вариации ср.кв. амплитуды сигнала радиопередатчика Хабаровск: 8.9 дБ в декабре, 6.4 дБ в марте, 4.2 дБ в июне и 5.7 дБ в сентябре. Вариации фазы за сутки: 28° в декабре, 18° в марте, 23° в июне, 32° в сентябре.

В декабре дневные условия распространения ОНЧ на радиотрассе Новосибирск – Якутск: с 03 UT (восход Новосибирск) до 05:30 UT (заход Якутск). Ср.кв. амплитуды сигнала Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 49.2 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 268°. Ночные условия распространения в декабре (трасса Новосибирск – Якутск): 10 UT (заход Новосибирск) до 01 UT (восход в Якутске). Ср.кв. амплитуды сигнала Новосибирск в местную полночь на середине радиотрассы в декабре: 51 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 322°. В период прохождения границы «день - ночь» вблизи 10 UT – максимум амплитуды: 57.6 дБ(мкВср.кв./м). Регистрируется послезаходный максимум фазовой задержки: 340°(12:39UT). В период прохождения восходного терминатора в 2:36 UT – минимум амплитуды сигнала передатчика Новосибирск: 46.8 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 23:30 UT – максимум фазовой задержки: 345°, а затем минимум: 265°(2:27 UT). В марте дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала (трасса Новосибирск – Якутск): с 00:40 UT (восход Новосибирск) до 09:30 UT (заход Якутск). Ср.кв. амплитуды сигнала радиопередатчика Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 56 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка составляет 252°. Ночные условия распространения в марте (трасса Новосибирск – Якутск): с 12:40 UT (заход Новосибирск) до 21:30 UT (восход в Якутске). Ср.кв. амплитуды сигнала Новосибирск в местную полночь на середине радиотрассы: 56.3 дБ(мкВср.кв./м),

фазовая задержка: 325° . В результате интерференции мод высших порядков в период прохождения границы «день - ночь» около 12:51 UT – максимум амплитуды Новосибирск: 58.3 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 13:18 UT регистрируется максимум фазовой задержки: 323° . В период прохождения восходного терминатора – минимум амплитуды сигнала Новосибирск в 00 UT: 54 дБ(мкВср.кв./м), регистрируется спад фазовой задержки сигнала. В июне дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала в волноводе Земля – ионосфера на трассе Новосибирск – Якутск: с 22 UT (восход Новосибирск) до 13 UT (заход Якутск). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 60 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 257° . Ночные условия распространения в июне (трасса Новосибирск – Якутск): с 15 UT (заход Новосибирск) до 18 UT (восход Якутск). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Новосибирск в местную полночь на середине радиотрассы: 60.5 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 324° . В период прохождения заходного терминатора в 13:57 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала Новосибирск: 59 дБ(мкВср.кв./м). В период прохождения восходного терминатора в амплитуде регистрируются два минимума: 57.6 дБ(мкВср.кв./м) и 57.7 дБ(мкВср.кв./м) в 19:48 и 20:45 UT соответственно. В сентябре дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала (трасса Новосибирск – Якутск): с 22:40 UT (восход Новосибирск) до 12 UT (заход Якутск). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 59.3 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 237° . Ночные условия распространения в сентябре (трасса Новосибирск – Якутск): с 12:30 UT (заход Новосибирск) до 21 UT (восход Якутск). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Новосибирск в местную полночь на середине радиотрассы: 59.7 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 327° . После прохождения границы «день - ночь» в 13:39 UT регистрируется послезаходный максимум амплитуды сигнала Новосибирск: 61.8 дБ(мкВср.кв./м), вблизи 13:48 UT – максимум фазовой задержки: 332° . В период прохождения восходного терминатора в 22:21 UT регистрируется минимум амплитуды радиосигнала Новосибирск: 56.4 дБ(мкВср.кв./м). К подходу восходного терминатора к приемнику в Якутске регистрируется максимум фазовой задержки: 342° (20:18UT). На восходе задержка фазы сигнала Новосибирск уменьшается, выделяются два перегиба в 21:48 и 22:54 UT. Суточные вариации ср.кв. значения амплитуды сигналов навигационной станции Новосибирск: 10.4 дБ в декабре, 5.3 дБ в марте, 3 дБ в июне и 4.3 дБ в сентябре. Вариации фазы сигнала Новосибирск за сутки: 85° в декабре, 72° в марте, 70° в июне, 107° в сентябре.

В декабре дневным условиям распространения ОНЧ сигнала на радиотрассе Краснодар – Якутск (протяженная радиотрасса, треть из которой по дуге большого круга находится в высоких широтах, середина радиотрассы: $62^\circ 28' \text{ N}$, $72^\circ 9' \text{ E}$) соответствует интервал с 04 UT (восход на середине радиотрассы) до 06 UT (заход вблизи Якутска). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Краснодар в местный полдень на середине радиотрассы: 36 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка составляет 240° . Ночные условия распространения в декабре (трасса Краснодар – Якутск): с 14 UT (заход Краснодар) до 01 UT (восход Якутск). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Краснодар в полночь на середине радиотрассы в декабре: 44.5 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 393° . В период прохождения заходного терминатора: повышение амплитуды и фазовой задержки сигнала. При прохождении по трассе Краснодар – Якутск восходного терминатора регистрируется понижение амплитуды, в понижении фазовой задержки сигнала Краснодар регистрируется перегиб в 02:12 UT. В марте

дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала (трасса Краснодар – Якутск): с 3:30 UT (восход Краснодар) до 09:30 UT (заход Якутск). Ср.кв. амплитуды сигнала Краснодар в местный полдень на середине радиотрассы: 41.7 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 218°. Ночные условия распространения (трасса Краснодар – Якутск): 16:30 UT (заход вблизи Краснодара) до 21:30 UT (восход в Якутске). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Краснодар в полночь на середине радиотрассы: 47.7 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 402°. В период прохождения границы «день – ночь» около 03:18 UT – минимум амплитуды сигнала: 37.6 дБ(мкВср.кв./м). В период прохождения восходного терминатора – минимум амплитуды сигнала Краснодар 42.2 дБ(мкВср.кв./м) в 23:36 UT, вблизи 02:12 UT при спаде фазовой задержки регистрируется перегиб. В июне дневные условия распространения ОНЧ радиосигнала (трасса Краснодар – Якутск): с 01:45 UT (восход Краснодар) до 16 UT (заход на середине радиотрассы). Ср.кв. амплитуды сигнала Краснодар в местный полдень на середине радиотрассы: 48 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 222°. Ночные условия распространения в июне (Краснодар – Якутск): с 18 UT (заход Краснодар) до 21 UT (восход на середине радиотрассы). Ср.кв. амплитуды сигнала Краснодар в полночь на середине радиотрассы: 48.4 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 346°. При прохождении заходного терминатора в 15:18 UT – минимум амплитуды сигнала Краснодар: 45.3 дБ(мкВср.кв./м), в 15:15 UT – перегиб фазовой задержки сигнала. При восходе в амплитуде регистрируется минимум: 43.5 дБ(мкВср.кв./м) в 0:23 UT. В сентябре дневные условия распространения ОНЧ на трассе Краснодар – Якутск: с 2:30 UT (восход около Краснодара) до 12 UT (заход вблизи Якутска). Ср.кв. значение амплитуды сигнала Краснодар в полдень на середине радиотрассы: 44.2 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 185°. Ночные условия распространения в сентябре (трасса Краснодар – Якутск) с 16:30 UT (заход вблизи Краснодара) до 21 UT (восход Якутск). Ср.кв. амплитуды сигнала Краснодар в полночь на середине радиотрассы: 50 дБ(мкВср.кв./м), фазовая задержка: 416°. При прохождении границы «день-ночь» регистрируется плавное увеличение амплитуды и фазовой задержки сигнала Краснодар. При прохождении восходного терминатора вдоль радиотрассы регистрируется серия минимумов и максимумов в амплитуде: 23:39 UT (минимум 46.3 дБ(мкВср.кв./м)), 00:12 UT (максимум 46.6 дБ(мкВср.кв./м)), 01:03 UT (минимум 44.2 дБ(мкВср.кв./м)), 01:33 UT (максимум 45.2 дБ(мкВср.кв./м)), 02:00 UT (минимум 42.1 дБ(мкВср.кв./м)). В вариациях фазы сигнала Краснодар при прохождении восходного терминатора – серия перегибов в 00:27 UT, 00:54 UT и 01:45. Суточные вариации ср.кв. значения амплитуды радиосигнала Краснодар: 10.3 дБ в декабре, 10.4 дБ в марте, 4.8 дБ в июне и 8 дБ в сентябре. Суточные вариации фазы радиосигнала Краснодар: 156° в декабре, 236° в марте, 129° в июне, 240° в сентябре.

Установлено, что наиболее ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды. Это связано с уменьшением зенитного угла Солнца на радиотрассах с декабря по июнь и с увеличением высотного градиента концентрации электронов в нижней ионосфере. Зимой регистрируются меньшие амплитуды ОНЧ радиоволн с большими флуктуациями. В этом проявляется также зимняя аномалия нижней ионосферы [1]: повышение концентрации оксида азота NO (относительно молекулярного кислорода) который активно ионизируется под действием интенсивного потока солнечной линии водорода Лайман- α (121.6 нм) на высотах области D в зимний период. Повышаются значения концентрации электронов и их флуктуации в нижней ионосфере, но при этом высотный градиент концентрации остается

малым, в результате чего повышается затухание в волноводе Земля – ионосфера. Наблюдается асимметрия дневных сезонных вариаций амплитуды ОНЧ. Амплитуда осеннего равноденствия ближе к летнему солнцестоянию, а амплитуда весеннего равноденствия – к зимнему солнцестоянию. Это согласуется с сезонной асимметрией высотных профилей электронной концентрации нижней ионосферы [16].

Среднеквадратичные значения амплитуды ОНЧ радишума зарегистрированные в Якутске в 2015 г представлены на рис. 2.

Рис. 2. Среднеквадратичные значения амплитуды ОНЧ радишума (11.9 кГц, эффективная полоса 334.8 Гц), зарегистрированного в Якутске в 2015 г.

Суточная вариация амплитуды ОНЧ шума составляет: 10 дБ (март), 13 дБ (июнь), 11.5 дБ (сентябрь) и 12 дБ (декабрь). В сезонной вариации интенсивности радишумов максимум наблюдается в летнее время.

Основными источниками регистрируемого в Восточной Сибири ОНЧ радишума являются 2 мощных грозовых очага, существующих постоянно в летний период. Первый очаг расположен на территории Западносибирской равнины. Второй очаг расположился по меридиану от южных хребтов Большого и Малого Хингана до севера Станового хребта, по параллели — с запада от Большого Хингана до южных гор Малого Хингана и Бурецкого хребта на востоке [17]. Регистрируемые в Якутске ОНЧ радишумы, источниками которых являются рассмотренные грозовые очаги, распространяются по сходным трассам, что и сигналы от передатчиков Новосибирск и Хабаровск. В суточных вариациях интенсивности ОНЧ радишума выделяются три периода: 3 – 6 UT (минимум грозовой активности, максимум дневного затухания в волноводе Земля – ионосфера); 6 – 12 UT (максимум вклада местной грозовой активности летом); 15 – 19 UT — максимум зимой, весной и осенью, а также второй летний максимум, обусловленный ночным временем в окрестности пункта регистрации, при минимальном затухании в волноводе Земля – ионосфера. Наименьшее отношение сигнал/шум для наиболее удаленного от Якутска передатчика Краснодар, составляет 2.5 дБ (летний период 6 – 12 UT).

Выбраны интервалы времени, соответствующие дневным и ночным условиям распространения сигнала по радиотрассам: Хабаровск — Якутск: 2 - 6 UT (день), 15 - 16 UT (ночь); Новосибирск — Якутск: 3 - 7 UT (день), 16:30 - 17:30 UT (ночь);

Краснодар — Якутск: 5 - 7 UT (день), 18 - 19 UT (ночь). На основе суточных и сезонных вариаций интенсивности радишума выбраны интервалы времени: 3 - 6 UT (день), 16:30 - 17:30 UT (ночь). Сезонные вариации среднеквадратичных значений амплитуды сигналов радиопередатчиков и радишума (11.904 кГц) получены на основе медианного усреднения за каждый месяц в дневные и ночные интервалы. Флуктуации оцениваются на основе квартилей 25% и 75%.

11-летний цикл солнечной активности (С.А.) характеризуется интенсивностью потока радиоизлучения на длине волны 10.7 см (индекс F10.7). Сезонные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигналов радиопередатчиков и радишума (11.904 кГц) для дневного и ночного распространения, а также индекс F10.7 за период 2009 - 2017 гг представлены на рис. 3.

Рис. 3. Сезонные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигналов радиопередатчиков и радишума (11.904 кГц) для дневного и ночного распространения, а также индекс F10.7 за период 2009-2017 гг.

В сезонных вариациях амплитуды радиосигналов выделяется, в основном, годовая составляющая. В дневные часы сезонная вариация амплитуд относительно стабильна год от года. Зимой с увеличением С.А. в 24-м цикле (с 2009 до 2014 гг), амплитуда радиосигнала от передатчика Хабаровск увеличивается на 9 ± 1 дБ днем и на 4 ± 1.5 дБ ночью, а в период спада активности (2015-2017 гг) – регистрируется понижение амплитуды принимаемого сигнала. С увеличением С.А. в зимний период, амплитуда радиосигнала передатчика Новосибирск увеличивается на 11 ± 1.5 дБ днем и 6 ± 1.3 дБ ночью, на фоне спада С.А. — понижение амплитуды. Летом отмечается понижение амплитуды на 2 ± 0.6 дБ на фоне спада С.А. Зимой с повышением С.А. амплитуда сигнала радиопередатчика Краснодар увеличивается на 6 ± 1.2 дБ днем и 8 ± 1.8 дБ ночью. Летом – увеличивается на 3 ± 0.7 дБ днем, 3 ± 0.6 дБ ночью от минимума до максимума С.А. На фоне спада С.А. (2015-2017 гг) отмечается понижение амплитуды. С повышением С.А. интенсивность радиошума в зимний период увеличивается на 11 ± 1.2 дБ днем и 6 ± 1.5 дБ ночью.

Таким образом, зарегистрировано нарастание интенсивности ОНЧ-радиошума и амплитуды сигналов радиопередатчиков в период нарастания в 24-м цикле солнечной активности (период нарастания индекса F10.7: 2009-2014 гг). В период спада солнечной активности (2015-2017 гг) регистрируется спад интенсивности ОНЧ-радиошума и амплитуды радиосигналов как для лета, так и для зимы. В периоды нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности отмечены большие изменения амплитуды ОНЧ-сигнала, зарегистрированные зимой, по сравнению с летом.

Сезонные вариации фазы сигналов радиопередатчиков (11.904 кГц) для дневного и ночного распространения, а также значения индекса F10.7 за период 2009-2017 гг. представлены на рис. 4. В более стабильных дневных сезонных вариациях фазы радиосигналов выделяется годовая составляющая. На фоне сезонных изменений в период повышения, максимума и спада в 24-м цикле С.А., межгодовые вариации фазы ОНЧ радиосигналов не выделены. На фоне повышения С.А. (2009-2014 гг) в зимний период ночью регистрируется повышение фазовой задержки на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск-Якутск (1400 км) на $23 \pm 6^\circ$. Интерференция мод высших порядков при регистрации радиосигналов ночью на меньшем удалении от передатчика может приводить к повышению чувствительности к изменениям параметров волновода Земля – ионосфера. Следует отметить, что и основные максимумы индекса F10.7 в 24-м цикле солнечной активности приходятся на поздний осенний и зимний периоды.

Полученные в данной работе суточные и сезонные вариации интенсивности радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков системы РСДН-20 на частоте 11.904 кГц соответствуют вариациям указанных параметров радиосигналов на частоте 14.881 кГц [15]. Полученные нами межгодовые вариации амплитуды ОНЧ радиопередатчиков в 11-летнем цикле солнечной активности не противоречат результатам работы [5].

Заключение

Возможность выбора пространственных и временных масштабов, при малых затратах, делают регистрацию вариаций параметров ОНЧ полезным инструментом для мониторинга областей нижней ионосферы: области D (днем) и E (ночью).

Рис. 4. Сезонные вариации фазы сигналов радиопередатчиков (11.904 кГц) для дневного и ночного распространения, а также индекс F10.7 за период 2009-2017 гг.

Регистрируемые суточные вариации амплитуды интерпретируются как изменения высотного градиента электронной концентрации нижней ионосферы, следствием чего является изменение коэффициента затухания радиоволн. Днем соответствует большее затухание и меньшая фазовая задержка принимаемого ОНЧ радиосигнала. Наиболее ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды. Зарегистрировано увеличение фазовой задержки радиосигнала от дня к ночи. Это характерно для увеличения эффективной высоты волновода Земля-ионосфера. Исключение — уменьшение фазовой задержки в ночное зимнее время на радиотрассе малой

протяженности Хабаровск-Якутск как возможный результат интерференции мод высших порядков. Зимой регистрируются меньшие амплитуды ОНЧ радиоволн с большими флуктуациями как проявление зимней аномалии нижней ионосферы. Наблюдается асимметрия дневных сезонных вариаций амплитуды ОНЧ. Амплитуда осеннего равноденствия ближе к летнему солнцестоянию, а амплитуда весеннего равноденствия – к зимнему солнцестоянию.

В сезонных вариациях амплитуды радиосигналов выделяется, в основном, годовая составляющая. В дневные часы сезонные вариации амплитуды и фазы относительно стабильны год от года. В периоды нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности отмечены большие изменения амплитуды ОНЧ сигнала, зарегистрированные зимой, по сравнению с летом. На фоне сезонных изменений в период повышения, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности, межгодовые вариации фазы ОНЧ радиосигналов не выделены. На фоне повышения солнечной активности (2009-2014 гг) в зимний период ночью регистрируется повышение фазовой задержки на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск-Якутск (1400 км) на $23 \pm 6^\circ$.

Поскольку получено, что вариации амплитуды, фазы сигналов радиопередатчиков и интенсивности радишума диапазона ОНЧ определяются уровнем солнечной активности, необходимо продолжить регистрацию в 25-ом цикле солнечной активности.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литература/References

- [1] Данилов А.Д. и др., *Метеорологические эффекты в ионосфере*, Гидрометеиздат, Л., 1987, 271 с. [Danilov A.D. et al., *Meteorologicheskie efekty v ionosfere*, Gidrometeoizdat, L., 1987, 271 pp.]
- [2] Silber I., Price C., “On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere–lower thermosphere”, *Surveys in Geophysics*, **38** (2017), 407–441.
- [3] Barr R., Jones D. L., Rodger C. J., “ELF and VLF radio waves”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **62**:17–18 (2000), 1689–1718.
- [4] Parrot M., Inan U. S., Lehtinen N. G., “V-shaped VLF streaks recorded on DEMETER above powerful thunderstorms”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **113**:A10 (2008), A10310.
- [5] Thomson N. R., Clilverd M. A., “Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **62**:7 (2000), 601–608.
- [6] Silber I., Price C., Rodger C. J., “Semi-annual oscillation (SAO) of the nighttime ionospheric D region as detected through ground-based VLF receivers”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16** (2016), 3279–3288.
- [7] Thomson N. R., Clilverd M. A., Rodger C. J., “Low-latitude ionospheric D region dependence on solar zenith angle”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **119**:8 (2014), 6865–6875.
- [8] Silber I. et al., “Links between mesopause temperatures and ground-based VLF narrowband radio signals”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**:10 (2013), 4244–4255.
- [9] Pal S., Hobara Y., “Mid-latitude atmosphere and ionosphere connection as revealed by very low frequency signals”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **138-139** (2016), 227–232.

- [10] Smirnova N. V., Danilov A. D., "Effects of Solar activity in the D region of the ionosphere", *Geomagnetism and aeronomy*, **38**:3 (1998), 334–340.
- [11] Нестеров В. И., "Влияние солнечной активности на фазу принимаемого сигнала ОНЧ-диапазона", *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, **22**:3 (2019), 21–26. [Nesterov V. I., "Vliyanie solnechnoy aktivnosti na fazu prinimaemogo signala ONCh-diapazona", *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, **22**:3 (2019), 21–26].
- [12] Peters D. H. W., Entzian G., "Long-term variability of 50 years of standard phase-height measurement at Kuhlungsborn, Mecklenburg, Germany", *Advances in Space Research*, **55**:7 (2015), 1764–1774.
- [13] Calvo N. et al., "Nonlinearity of the combined warm ENSO and QBO effects on the Northern Hemisphere polar vortex in MAECHAM4 simulations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**:D13109 (2009), D13109 1–11.
- [14] Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б., "Современное состояние исследований распространения СДВ в волноводном канале Земля ионосфера (Обзор)", *Известия ВУЗов. Радиофизика*, **13**:3 (1970), 321–355. [Makarov G. I., Novikov V. V., Orlov A. B., "Modern state of investigations of the propagation of ultralong waves in the earth-ionospheric waveguide channel (review)", *Radiophysics and Quantum Electronics*, **13**:3 (1970), 245–272].
- [15] Каримов Р. Р. и др., "Вариации параметров сигналов Радиостанций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот", *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **9**:4 (2012), 57–62. [Karimov R. R. et al., "Variatsii parametrov signalov Radiostantsiy, registriruemykh v Yakutske v diapazone ochen' nizkikh chastot", *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **9**:4 (2012), 57–62].
- [16] Альперт Я. Л., *Распространение электромагнитных волн и ионосфера*, Изд. 2-е, переработанное и дополненное, Наука, М., 1972, 564 с. [Al'pert Ya. L., *Rasprostranenie elektromagnitnykh voln i ionosfera*, Izd. 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe, Nauka, M., 1972, 564 pp.]
- [17] Tarabukina L., Kozlov V., "Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019", *Atmosphere*, **11**:9 (2020), 918.

PACS 94.20.ws, 94.20.Bb, 94.20.de, 94.20.dg, 92.60.Vb

Research Article

Diurnal and seasonal amplitude and phase variations of the radio signals of RSDN-20 transmitters and the intensity of radio noise (11.9 kHz) registered in Yakutsk during 2009-2017

A. A. Korsakov¹, V. I. Kozlov¹, Ye. A. Pavlov^{1,2}

¹ Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakut Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 677027, Yakutsk, Lenin ave., 31, Russia

² M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, 677000, Yakutsk, Belinskogo st., 58, Russia

E-mail: korsakovaa@ikfia.ysn.ru

The daily, seasonal and interannual variations of the radio noise intensity, the amplitude and phase of signals from the long-range navigation radio system RSDN-20 are analyzed based on the registration at a frequency of 11.904 kHz in Yakutsk during increase, maximum and decrease periods in the 24th solar cycle activity (2009-2017). The most pronounced seasonal daytime amplitude variations. The signal phase delay increase from day to night was recorded, which is characteristic of an increase in the effective height of the Earth-ionosphere waveguide. The observed phase delay decrease in the winter night time on the short radio propagation path Khabarovsk-Yakutsk can be explained by the interference of higher-order modes. There is an asymmetry of the daytime seasonal variations of the amplitude of VLF radio signals (11.904 kHz). During daytime, seasonal variations in amplitude and phase are relatively stable from year to year. Against the background of an increase in solar activity in winter, at night, the phase delay increase is recorded by $23 \pm 6^\circ$ on a shorter radio path Khabarovsk-Yakutsk (1400 km).

Key words: VLF radio wave propagation, Earth - ionosphere waveguide, radio noise.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-122-136

Original article submitted: 20.10.2020

Revision submitted: 03.02.2021

For citation. Korsakov A. A., Kozlov V. I., Pavlov Ye. A. Diurnal and seasonal amplitude and phase variations of the radio signals of RSDN-20 transmitters and the intensity of radio noise (11.9 kHz) registered in Yakutsk during 2009-2017. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **34**: 1, 122-136. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-122-136

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Korsakov A. A., Kozlov V. I., Pavlov Ye. A., 2021

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment for project II.16.2.1 (state registration number №AAAA-A17-117021450059-3) and partially with the support of the Russian Foundation for Basic Research №18-45-140028 r_a.