
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 537.877

DOI 10.25587/SVFU.2023.58.22.003

Вариации амплитуды ОНЧ радиосигналов передатчиков JXN и DHO при регистрации в Якутске в период солнечного затмения 10 июня 2021 г.

А. А. Корсаков¹ ✉, Н. А. Сокрут²

¹Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ korsakov84@yandex.ru

Аннотация. Солнечное затмение оказывает влияние на верхнюю атмосферу Земли. Преимуществом такого естественного воздействия является то, что время затмения можно рассчитать заранее и подготовиться к экспериментам. Динамические процессы во время каждого затмения зависят от гелиогеофизической обстановки. Радиоволны диапазона ОНЧ способны распространяться на тысячи километров в волноводе Земля – ионосфера. Расположение ОНЧ радиотрасс определяет пространство для мониторинга нижней ионосферы (как части верхней атмосферы). Исследовались вариации амплитуд ОНЧ радиосигналов, принимаемых в Якутске от передатчиков DHO (23,4 кГц, 53,08° N, 7,62° E) и JXN (16,4 кГц, 66,97° N, 13,87° E). Большая часть этих радиотрасс располагается на арктической территории Евразии. Зарегистрированные суточные вариации амплитуды ОНЧ сигналов DHO и JXN с 7 по 13 июня 2021 г. объясняются вариацией потока ионизирующего излучения солнца, интерференцией мод высших порядков при прохождении восходного и заходного терминаторов по участкам радиотрасс, а также режимом работы передатчиков. В период солнечного затмения 10 июня 2021 г. минимальное среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной составило 0,532 (11:39:18 UTC) и 0,411 (11:33:00 UTC) вдоль радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск соответственно. Эффект затмения проявился в виде повышения амплитуды в максимуме на 1,62 дБ (11:39:18 UTC) и 1,4 дБ (11:26:42 UTC) для сигналов DHO и JXN соответственно. Малые затраты на изготовление ОНЧ приемников, возможность охвата больших территорий делают регистрацию ОНЧ сигналов удобным инструментом для зондирования нижней ионосферы над труднодоступными и малонаселенными территориями.

Ключевые слова: диапазон очень низких частот, распространение радиоволн, волновод Земля–ионосфера, амплитуда радиосигнала, ионосфера, солнечное затмение, бесселевы элементы, линейная фаза затмения, поверхностная фаза затмения, отношение площадей открытой части диска Солнца к полной, поток ионизирующего излучения Солнца.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).

Для цитирования: Корсаков А. А., Сокрут Н. А. Вариации амплитуды ОНЧ радиосигналов передатчиков JXN и DHO при регистрации в Якутске в период солнечного затмения 10 июня 2021 г. Вестник СВФУ. 2023, Т. 20, №1. С. 29–41. DOI: 10.25587/SVFU.2023.58.22.003.

© Корсаков А. А., Сокрут Н. А., 2023

Amplitude variations of VLF radio signals of JXN and DHO transmitters received in Yakutsk during the solar eclipse June 10, 2021

A. A. Korsakov¹ ✉, N. A. Sokrut²

¹The Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy studies, SB RAS, Yakutsk, Russia

²M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ korsakov84@yandex.ru

Abstract. A solar eclipse affects the Earth's upper atmosphere. The eclipse time can be calculated in advance, which allows us to prepare for experiments. Dynamic processes during each specific eclipse depend on the heliogeophysical environment. VLF radio waves can propagate thousands of kilometers in the Earth-ionosphere waveguide. The location of the VLF radio paths determines the space for monitoring the lower ionosphere (as a part of the upper atmosphere). We applied a method of studying the amplitude variation of VLF radio signals from DHO (23.4 kHz, 53.08° N, 7.62° E) and JXN (16.4 kHz, 66.97° N, 13.87° E) transmitters received in Yakutsk. The most part of these radio paths is located along the Arctic territory of Eurasia. The diurnal VLF amplitude variations of the DHO и JXN signals from June 7 to 13 are explained by the solar ionizing flux variation, the higher-order modes interference during the passage of the rising and setting terminators along the elements of the radio paths, and the transmitters operating mode. During the solar eclipse of June 10, 2021, the minimum average ratio value of the open part of the solar disk area to the full disk area was 0.532 (11:39:18 UTC) and 0.411 (11:33:00 UTC) along the DHO – Yakutsk and JXN – Yakutsk radio paths, respectively. The eclipse effect appeared as an amplitude increase at the maximum of 1.62 dB (11:39:18 UTC) and 1.4 dB (11:26:42 UTC) for the DHO and JXN signals, respectively. Furthermore, our data provide the low VLF receivers manufacturing costs and the ability to cover large areas make the VLF registration a convenient tool for sounding the lower ionosphere over the hard-to-reach and sparsely populated areas.

Keywords: very low frequency range, radio wave propagation, Earth – ionosphere waveguide, radio signal amplitude, ionosphere, solar eclipse, Besselian elements, eclipse magnitude, eclipse obscuration, the ratio of the areas of the open part of the solar disk to the full one, solar ionizing radiation flux.

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment (state registration number 122011700182-1).

For citation: Korsakov A. A., Sokrut N. A. Amplitude variations of VLF radio signals of JXN and DHO transmitters received in Yakutsk during the solar eclipse June 10, 2021. Vestnik of NEFU. 2023, Vol. 20, No. 1. Pp. 29–41. DOI: 10.25587/SVFU.2023.58.22.003.

Введение

Непрерывные исследования нижней ионосферы: области D (50–90 км) и E (90–120 км), а также нейтральной атмосферы на прилегающих высотах мезосферы и нижней термосферы – сложны и затратны [1]. Большинство методов диагностики является локальным и не способным охватить малонаселенные и труднодоступные территории [2, 3].

Ионизирующими излучениями области D ионосферы являются энергичная часть солнечного рентгеновского спектра, интенсивная солнечная линия водорода Лайман-α (121,6 нм), для области E – крайнее ультрафиолетовое излучение. Дополнительные источники ионизации области E: метеоры, космические лучи, диффузия ионов и электронов из области F. Ночная ионосфера, в отличие от дневной, менее стабильна. Требуется большой объем измерений, чтобы правильно моделировать химию и динамику ионосферы [4].

Распространение радиоволн диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц) на тысячи километров возможно благодаря отражению от земли и водной поверхности, а также от нижней ионосферы: днем от области D, а ночью от области E. Так для ОНЧ формируется волновод Земля – ионосфера. Затухание и высота отражения ОНЧ радиоволн от областей D и E зависят от интенсивности источников ионизации, динамических и химических процессов в атмосфере [5]. Природными источниками излучения ОНЧ радиоволн являются в основном гроззовые разряды, а искусственными – радиостанции дальней навигации и точного времени [6]. Радиопередатчики способны излучать сигналы с постоянными параметрами (мощностью, начальной фазой). Вариации параметров радиосигналов вдоль трассы их распространения дают информацию о свойствах нижней ионосферы. Такой мониторинг может выполняться на разных временных и пространственных масштабах, охватывать труднодоступные территории.

Во время солнечного затмения тень Луны перекрывает потоки ионизирующего излучения Солнца. Солнечное затмение дает возможность изучить механизмы изменений параметров ионосферы. Так как время его наступления предопределено, то это позволяет заранее подготовиться к эксперименту. Динамические процессы во время каждого затмения зависят от геофизической обстановки и степени возмущенности Солнца [7, 8].

В работе [9] исследовались ионосферные эффекты во время полного солнечного затмения в Европе 11 августа 1999 г. Анализ амплитуды и фазы четырех передатчиков в диапазоне 16–24 кГц был выполнен для 19 трасс протяженностью от 90 до 14510 км. Повышение амплитуды наблюдалось на коротких радиотрассах (менее 2000 км), а на длинных трассах (более 10000 км) – понижение амплитуды. Отрицательные фазовые изменения, характеризующие повышение эффективной высоты ионосферы, наблюдались на большинстве трасс. Типичные изменения составили 3 дБ и 50°.

В работе [10] исследовалось влияние ОНЧ сигнала во время солнечного затмения 29 марта 2006 г. Было показано, что амплитуда принимаемого сигнала увеличилась примерно на 20%. Указывалось, что в сравнении с амплитудой вариации фазы ОНЧ сигнала являются более чувствительной характеристикой изменений условий распространения.

В работе [11] были рассмотрены вариации амплитуды и фазы ОНЧ/НЧ-сигналов (20–45 кГц), принимаемых в Москве, Граце (Австрия) и Шеффилде (Великобритания) во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Четыре длинные радиотрассы пересекали область затенения 90–100%. Были обнаружены амплитудные и фазовые аномалии. Отрицательные фазовые аномалии: от -75° до -90°. Амплитудные аномалии были как положительными, так и отрицательными: не превышали 5 дБ. Эффективная высота ионосферы при затмении изменялась от 6,5 до 11 км.

В работе [12] представлены результаты регистрации ОНЧ/НЧ вариации фазы и амплитуды на трех радиотрассах во время полного солнечного затмения 21 августа 2017 г. Протяженность радиотрасс изменялась от 2200 до 6400 км. Две трассы пересекали полную полосу затмения, а третья трасса находилась в области 40–60% затенения. Для всех трех трасс заметного влияния на амплитуду не было зарегистрировано. Во время затмения было показано уменьшение фазы ОНЧ сигналов.

В работе [13] был рассмотрен эффект солнечного затмения 20 марта 2015 г. на радиотрассе ДНО – Якутск. Эффект затмения проявился в виде повышения амплитуды радиосигнала. Максимум повышения амплитуды в 10:15 UT составил 2,85 дБ (23,7% суточной вариации).

Чувствительность ОНЧ радиоволн к геофизическим явлениям зависит от протяженности радиотрассы, частоты сигнала, направления его распространения относительно магнитного поля Земли [14]. Исследования гелиогеофизических факторов, влияющих на распространение ОНЧ радиоволн в волноводе Земля – ионосфера, остаются актуальными.

10 июня 2021 г. лунная полутень коснулась земли в 8:12:18 UTC (23,48° N, 44,17° W). Кольцеобразное солнечное затмение началось около 9:55 UTC в Канаде (50° N и 90° W). Тень двигалась в северо-восточном направлении, далее через море Баффина прошла по северо-западной части Гренландии. В 10:41:51 UTC наступила наибольшая линейная фаза затмения 0,9435 (80,8° N, 66,8° W), которая длилась 3 минуты 51 секунду, ширина лунной тени составила 527 км. Далее лунная тень через Северный полюс вышла в Северный Ледовитый океан, проследовала в южном направлении, затронула Якутию, запад Чукотки, север Магаданской области и северо-запад Камчатского края. Завершилось кольцеобразное затмение около 11:30 UTC (64° N, и 151° E) [15]. Лунная полутень покинула землю в 13:11:24 UTC (41,26° N, 94,35° E) [16].

Цель работы: исследование факторов, влияющих на распространение ОНЧ радиоволн вдоль арктического побережья Евразии во время солнечного затмения.

Поставлена задача: на основе регистрации в г. Якутске с 7 по 13 июня 2021 года провести анализ вариаций амплитуды сигналов ОНЧ радиостанций в период солнечного затмения 10 июня 2021 года.

Приборы и методы исследования

В г. Якутске (62,02° N, 129,70° E) с 2009 г. проводится регистрация ОНЧ сигналов от радиопередатчиков. Блок-схема регистратора представлена на рис. 1. Сигнал принимается вертикальной штыревой антенной (действующая высота 2 м), расположенной на крыше корпуса факультетов естественных наук (КФЕН) СВФУ им. М.К. Аммосова. После предварительного усиления (32 дБ в полосе 0,3–100 кГц) сигнал по кабелю поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В качестве АЦП используется внешний модуль USB 3000. С помощью секундных импульсов (PPS) от GPS-часов производится запуск регистрации, синхронизированный по времени с режимами работы как радиопередатчиков, так и с другими подобными регистраторами. В качестве GPS-часов используется модуль Trimble Thunderbolt E. Точность PPS относительно UTC составляет ±15 нс (одна сигма). Высокостабильный сигнал с выхода генератора GPS-часов (10 МГц, точность $1,16 \cdot 10^{-12}$ (три сигма) после суток работы) через делитель частоты поступает на вход внешнего источника дискретизации АЦП.

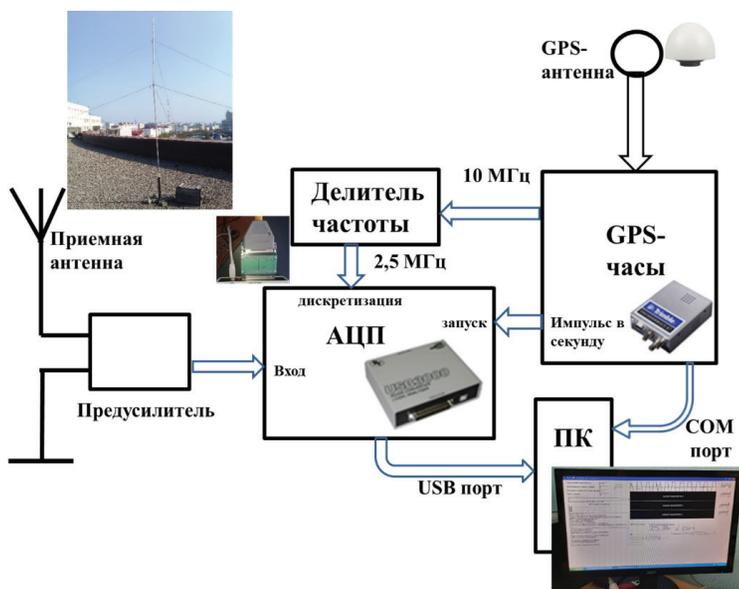


Рис. 1. Блок-схема регистратора ОНЧ радиосигналов
 Fig. 1. Block diagram of the recorder of VLF radio signals

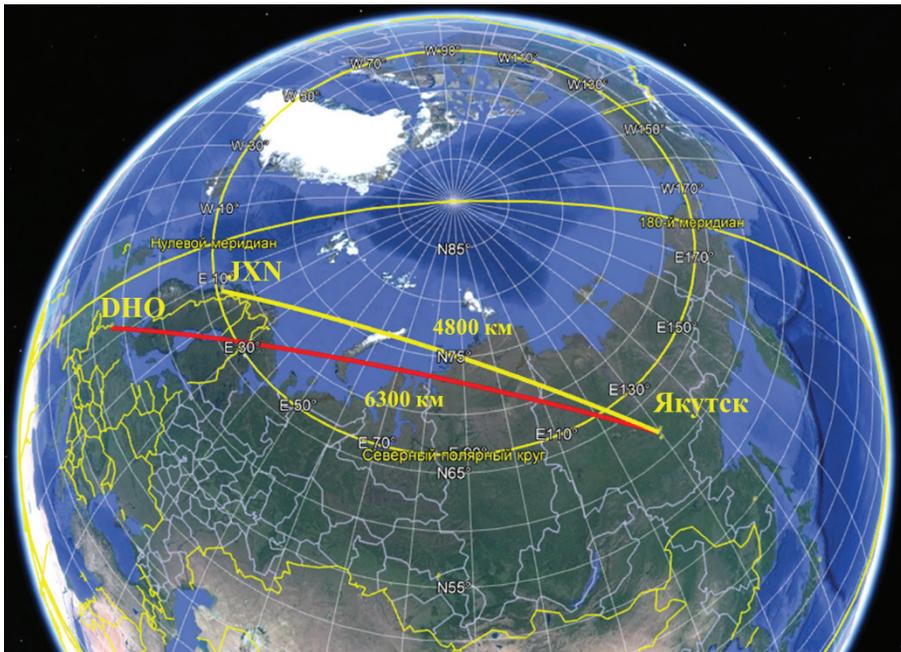


Рис. 2. Трассы распространения ОНЧ радиосигналов DHO и JXN при регистрации в Якутске
Fig. 2. Propagation paths of VLF radio signals DHO and JXN during registration in Yakutsk

Организована высокостабильная оцифровка принимаемого ОНЧ сигнала с частотой дискретизации 2,5 МГц. Оцифрованные данные по шине USB поступают на ноутбук с программой регистрации, разработанной в ИКФИА СО РАН. С 7 по 13 июня 2021 г. проводилась регулярная запись длительностью по 4 секунды, интервалы между записями 126 секунд.

Исследовались вариации амплитуд ОНЧ радиосигналов, принимаемых от передатчиков под названием DHO и JXN. Передатчик DHO расположен в Германии (53,08° N, 7,62° E), излучает радиосигнал на частоте 23,4 кГц. Передатчик JXN расположен в Норвегии (66,97° N, 13,87° E), излучает радиосигнал на частоте 16,4 кГц. Трассы распространения сигналов DHO и JXN при регистрации в Якутске представлены на рис. 2. Протяженности радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск составляют 6300 км и 4800 км соответственно. Большая часть каждой из радиотрасс располагается на арктической территории Евразии.

Амплитуды ОНЧ радиосигналов DHO и JXN выделялись при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Длительность окна ДПФ составляла 5 мс. На каждом интервале регистрации по 4 секунды проводилось медианное усреднение амплитуд каждого из радиосигналов. Были получены суточные вариации амплитуд с разрешением 126 секунд.

Радиотрассы DHO – Якутск (6300 км) и JXN – Якутск (4800 км) были разбиты на участки по 400 км. По географическим координатам участков радиотрасс, на основе бесселевых элементов затмения 10.06.2021 [16], по алгоритмам [17] получены распределения линейных фаз затмения Φ с разрешением по времени 126 секунд. По распределению Φ по алгоритму [18] получены распределения поверхностных фаз затмения S и отношения площадей открытой части диска Солнца к полной S_f/S_o с разрешением 400 км и 126 секунд для каждого из элементов радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск. В работе предполагается, что излучение по диску Солнца и его короне

Таблица

Обстоятельства солнечного затмения 10 июня 2021 г. вблизи радиопередатчиков ДНО и JXN, а также вблизи Якутска на основе выбранной модели

Table

Circumstances of the solar eclipse on June 10, 2021 near DHO and JXN radio transmitters, as well as near Yakutsk based on the selected model

Пункт наблюдения	Время начала затмения, UTC	Время максимальной фазы, UTC	Время окончания затмения, UTC	Максимальная поверхностная фаза S
ДНО	9:24:54	10:27:54	11:37:12	0,177
JXN	9:39:36	10:53:06	12:08:42	0,462
Якутск	10:46:48	11:45:36	12:44:24	0,802

распределено равномерно, а зенитный угол Солнца за время затмения постоянен. Относительное изменение потока ионизирующего излучения во время затмения может быть охарактеризовано отношением площадей открытой части диска Солнца к полной S_f/S_o .

Результаты

Рассчитанные нами обстоятельства солнечного затмения 10 июня 2021 г. вблизи радиопередатчиков ДНО и JXN, а также вблизи Якутска представлены в табл.

Максимальное затенение на трассе ДНО – Якутск произошло в Якутске. Максимальное затенение на трассе JXN – Якутск произошло на участке с координатами 64,62° N, 125,97° E в 11:43:30 UTC, при этом поверхностная фаза затмения $S = 0,806$.

Суточные вариации амплитуды радиосигнала ДНО, среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной S_f/S_o вдоль радиотрассы ДНО – Якутск во время затмения 10 июня 2021 г. представлены на рис. 3. В качестве регулярных суточных вариаций амплитуды сигнала ДНО на рис. 3 также представлены значения, полученные медианным усреднением амплитуд Med с 7 по 13 июня 2021 г., а флуктуации амплитуд представлены в виде Med – $qw_{25\%}$ и $qw_{75\%}$ – Med. При этом $qw_{25\%}$ и $qw_{75\%}$ – значения квартилей 25% и 75% в распределении амплитуд с 7 по 13 июня 2021 г. соответственно.

По географическим координатам на основе алгоритма [19] были рассчитаны косинусы зенитного угла Солнца на элементах радиотрассы. Западнее от элемента с координатами 67,42° N, 30,18° E в сторону передатчика ДНО Солнце заходило за горизонт. На этом участке радиотрассы средний косинус зенитного угла был отрицательным с 20:05:24 до 1:59:42 UTC. Этому временному интервалу соответствует плавное падение амплитуды до 4 дБ с последующим плавным возрастанием до 14 дБ (8:47:06 UTC). Такое падение амплитуды может быть связано с прохождением по части радиотрассы заходного и восходного терминаторов. С 7 до 8 UTC регистрируется резкое понижение амплитуды, связанное с отключениями передатчика (особенности режима работы). Восточнее от элемента с координатами 68,82° N, 113,30° E в сторону приемника Якутск солнце заходило за горизонт. На этом участке трассы средний косинус зенитного угла солнца был отрицательным с 13:49:30 до 17:57:24 UTC. Отмечается понижение амплитуды с 13 дБ до 11,5 дБ (14:44:06 UTC) с плавным восстановлением до прежнего значения 19 UTC. На большей части радиотрассы ДНО – Якутск солнце не заходило за горизонт,

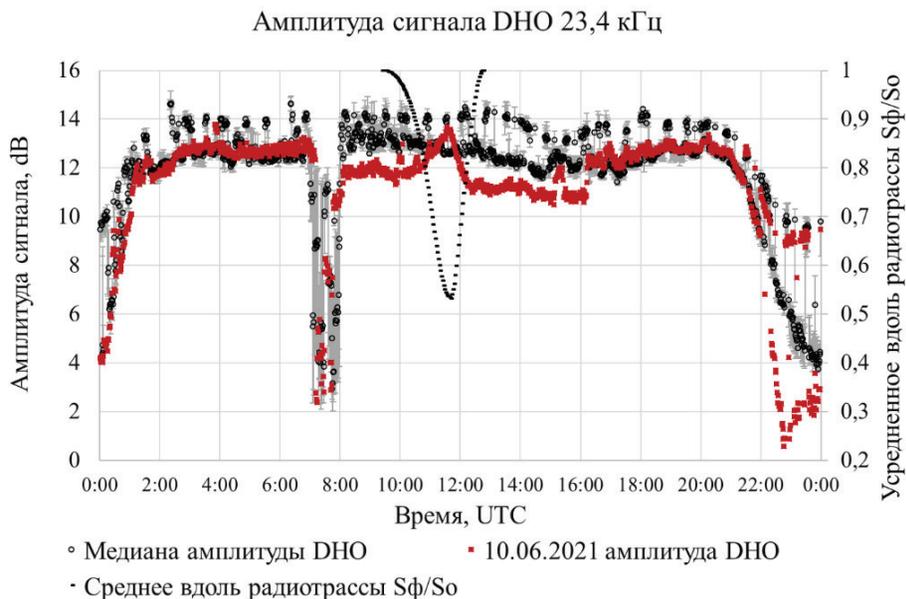


Рис. 3. Суточные вариации амплитуды радиосигнала DHO, среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной Sf/So вдоль радиотрассы DHO – Якутск во время затмения 10 июня 2021 г.

Fig. 3. Daily variations in the amplitude of the DHO radio signal, the average value of the ratio of the areas of the open part of the solar disk to the total Sph/So along the DHO-Yakutsk radio path during the eclipse of June 10, 2021

выполнялись условия полярного дня. В суточных вариациях амплитуды DHO проявляются выбросы с периодичностью около 30 минут. Такие выбросы возможно связаны с попаданием в спектр окна ДПФ сигналов других радиостанций, работающих на близких частотах, вследствие перегрузки предварительного усилителя. Одним из источников таких сигналов может быть передатчик системы точного времени, расположенный в окрестностях г. Хабаровска, работающий по определенному графику, излучающий на частоте 23 кГц [20].

10 июня 2021 г. в амплитуде сигнала DHO с 8:03:00 до 16:16:30 UTC в среднем меньше на 1,5 дБ. В 16:18:36 UTC амплитуда сигнала резко повышается до значений, соответствующих регистрации с 7 по 13 июня. Такое понижение амплитуды 10 июня 2021 г. может быть связано с работой передатчика DHO на пониженной мощности после его планового отключения в 7–8 UTC. Эффект солнечного затмения проявился в виде повышения амплитуды с 10:21:36 до 12:25:30 UTC. Амплитуда повысилась в максимуме на 1,62 дБ (11:39:18 UTC). При этом вдоль радиотрассы DHO – Якутск минимальное среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной Sf/So = 0,532 (11:39:18 UTC).

Суточные вариации амплитуды радиосигнала JXN, среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной Sf/So вдоль радиотрассы JXN – Якутск во время затмения 10 июня 2021 г. представлены на рис. 4. В качестве регулярных суточных вариаций амплитуды сигнала JXN на рис. 4 представлены значения, полученные медианным усреднением амплитуд Med с 7 по 13 июня 2021 г., флуктуации амплитуды представлены в виде Med – qw25% и qw75% – Med.

Были рассчитаны косинусы зенитного угла Солнца на элементах радиотрассы JXN – Якутск [19]. Солнце заходит за горизонт у передатчика JXN с 22:53:24 до 23:16:30

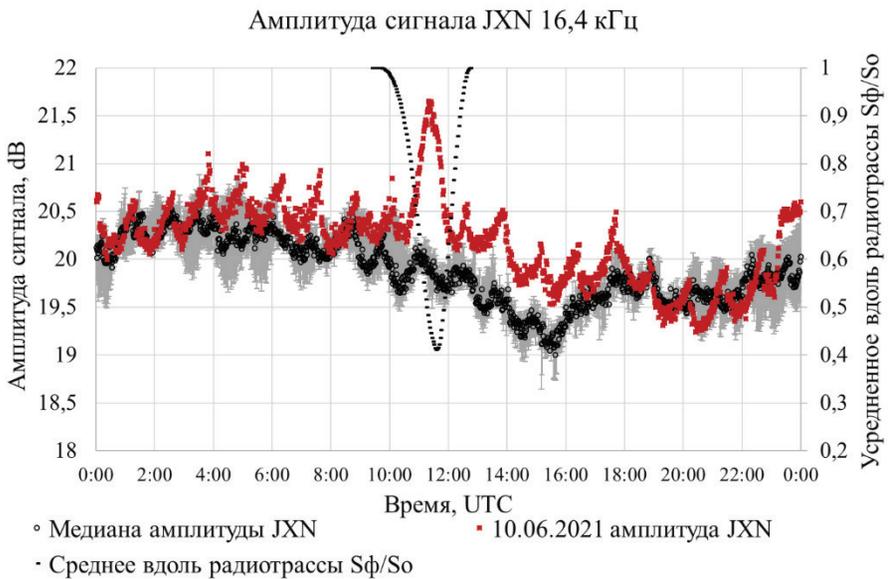


Рис. 4. Суточные вариации амплитуды радиосигнала JXN, среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной Sф/So вдоль радиотрассы JXN – Якутск во время затмения 10 июня 2021 г.

Fig. 4. Daily variations in the amplitude of the radio signal JXN, the average value of the ratio of the areas of the open part of the solar disk to the total Sph/So along the radio path JXN - Yakutsk during the eclipse of June 10, 2021

UTC. Затенение такого малого участка радиотрассы JXN – Якутск не сказалось на изменении амплитуды сигнала. Восточнее от элемента с координатами 67,5° N, 120,65° E, в сторону приемника Якутск, солнце заходило за горизонт. На этом участке трассы средний косинус зенитного угла солнца был отрицательным с 13:20:06 до 17:38:24 UTC. Отмечается понижение амплитуды с 20,4 дБ (6:34:48 UTC) до 19,1 дБ (15:36:36 UTC) с плавным восстановлением до прежнего значения. На большей части радиотрассы JXN – Якутск солнце не заходило за горизонт, выполнялись условия полярного дня.

10 июня 2021 г. эффект солнечного затмения проявился в виде повышения амплитуды сигнала JXN с 10:36:18 до 12:19:12 UTC. Амплитуда повысилась в максимуме на 1,4 дБ (11:26:42 UTC). При этом минимальное среднее вдоль радиотрассы JXN – Якутск значение отношения площадей открытой части солнечного диска к полной Sф/So = 0,411 (11:33:00 UTC).

Обсуждение

Полученные нами суточные вариации амплитуд ОНЧ сигналов ДНО и JXN, регистрируемых в Якутске в период 7–13 июня 2021 г., не противоречат результатам, представленным в работе [21]. Отмечается, что в летние месяцы ночные интервалы для протяженных трасс северного полушария относительно короткие: на радиотрассе ДНО – п. Лесная поляна (Иркутская область, протяженность трассы 6010 км) продолжительность ночных условий распространения изменяется от 2 часов до 2 часов 45 минут (1–14 августа). Необходимо отметить, что ОНЧ сигнал по радиотрассе ДНО – п. Лесная поляна распространяется в схожих условиях, что и по трассам ДНО – Якутск, JXN – Якутск: большая часть трассы расположена в высоких широтах в периоды, приближенные к полярному дню. При отсутствии ионизирующего излучения Солнца,

что характерно для ночных условий, отражение ОНЧ радиосигнала происходит от E области ионосферы. Ночная ионосфера, в отличие от дневной, менее стабильна. В распространении ОНЧ радиоволн повышается вклад мод высших порядков. Регистрируемые электромагнитные поля могут принимать осциллирующий характер.

С прохождением по трассе восходного терминатора под воздействием ионизирующего излучения Солнца происходит рост концентрации электронов в области E и образование области D ионосферы. Недостаточная для отражения концентрация электронов формирующейся D области приводит к поглощению энергии радиосигнала. Понижение амплитуды регистрируемого ОНЧ радиосигнала можно объяснить интерференцией мод при движении восходного терминатора. При прохождении терминатора по радиотрассе могут регистрироваться интерференционные минимумы и максимумы. Заходный (вечерний) терминатор создает схожий эффект. Переходной процесс в волноводе Земля–ионосфера при прохождении восходного терминатора более резкий, это связано с тем, что время ионизации (восход) меньше времени рекомбинации (заход) [14].

Регистрируемые дневные максимумы амплитуд ОНЧ сигналов соответствуют максимумам высотного градиента концентрации электронов области D ионосферы, приходящиеся на максимумы косинусов зенитного угла солнца на радиотрассах [22]. В нашей работе максимум амплитуды радиосигнала на трассе DHO – Якутск достигал значения 14 дБ в 8:47:06 UTC, а на трассе JXN – Якутск амплитуда принимала значение 20,4 дБ в 6:34:48 UTC. Времена максимумов дневных амплитуд 7–13 июня 2021 г. близки к наступлению местного полдня на середине каждой из радиотрасс.

Вблизи DHO расположен г. Бремен (53,08° N, 8,85° E). По данным [23] частное затмение в г. Бремене началось в 9:26:05 UTC, а закончилось в 11:38:35 UTC. Максимум линейной фазы затмения $\Phi_{\max} = 0,283$ в 10:30:50 UTC, максимум поверхностной фазы затмения $S_{\max} = 0,1702$. В районе передатчика JXN расположен г. Будё (67,28° N, 14,38° E). Частное затмение в г. Будё началось в 09:38:24 UTC, закончилось в 12:08:42 UTC. Максимальная линейная фаза затмения $\Phi_{\max} = 0,576$, $S_{\max} = 0,469$ (10:53:10 UTC). Частное затмение в г. Якутске началось в 10:46:09 UTC, а закончилось в 12:42:39 UTC. Максимум линейной фазы затмения $\Phi_{\max} = 0,836$ в 11:45:40 UTC, $S_{\max} = 0,773$. Сравнение значений, характеризующих обстоятельства затмения в окрестностях передатчиков DHO, JXN и приемника в Якутске [23], со значениями из табл., показало, что максимальное относительное изменение поверхностной фазы затмения не превышает 3,8% (DHO – г. Бремен). Время перекрытия радиотрасс тенью луны не противоречит зарегистрированным вариациям амплитуд ОНЧ сигналов в период солнечного затмения 10 июня 2021 г. Времени начала затмения на трассе DHO – Якутск соответствует 9:24:54 UTC (у передатчика DHO, см. табл.), время окончания – 12:44:24 UTC (приемник Якутск). Повышение амплитуды сигнала DHO зарегистрировано с 10:21:36 до 12:25:30 UTC. Времени начала затмения на трассе JXN–Якутск соответствует 9:39:36 UTC (у передатчика JXN). Повышение амплитуды сигнала JXN зарегистрировано с 10:36:18 до 12:19:12 UTC. Выбранная в нашей работе методика может быть использована для описания обстоятельств солнечного затмения на элементах ОНЧ радиотрасс с пространственно-временным разрешением 400 км и 126 сек.

Регистрируемые повышения амплитуд ОНЧ сигналов на радиотрассах DHO – Якутск и JXN – Якутск в период солнечного затмения 10 июня 2021 г. не противоречат результатам работ [9–11, 13] для радиотрасс протяженностью до 10000 км. Большую чувствительность фазовых вариаций ОНЧ–НЧ радиосигнала по сравнению с амплитудными можно объяснить следующим образом. При быстром изменении потока ионизирующего излучения во время солнечного затмения в нижней ионосфере начинается рекомбинация электронов с ионами. Уменьшается высотный градиент концентрации электронов, повышается эффективная высота волновода Земля – ионосфера. ОНЧ радиоволны отражаются от ионосферы на большей высоте, которой уже соответствует

высотный градиент, соответствовавший меньшим высотам в обычных условиях до затмения. На каждом из затененных участках радиотрассы нижняя ионосфера не успевает приобрести полностью ночные свойства вследствие быстрого окончания затмения и вновь начинающейся ионизации.

Вклад ионизирующего излучения Солнца в атмосферные процессы требует проверки глобальных моделей атмосферы в распределении электронов и ионов. Такая проверка может выполняться с помощью данных ОНЧ радиосигналов. При этом надежность проверок на соответствие может зависеть как от объема экспериментальных данных, так и от точности решения задач распространения радиоволн в волноводе Земля–ионосфера с учетом неоднородных анизотропных свойств [24].

Заключение

За период регистрации с 7 по 13 июня 2021 г. в Якутске получены устойчивые суточные вариации амплитуды ОНЧ сигналов радиостанций DHO и JXN. На большей части радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск солнце не заходило за горизонт, выполнялись условия полярного дня. Суточные вариации амплитуды ОНЧ сигналов DHO и JXN с 7 по 13 июня объясняются вариацией потока ионизирующего излучения (средним косинусом зенитного угла) солнца, интерференцией мод высших порядков при прохождении восходного и заходного терминаторов по участкам радиотрасс, а также режимом работы передатчиков.

При солнечном затмении 10 июня 2021 г. проведена оценка затенения на каждом из элементов радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск. Минимальное среднее значение отношения площадей открытой части диска Солнца к полной составило 0,532 (11:39:18 UTC) и 0,411 (11:33:00 UTC) вдоль радиотрасс DHO – Якутск и JXN – Якутск соответственно. Время перекрытия радиотрасс тенью луны не противоречит зарегистрированным вариациям амплитуд ОНЧ сигналов в период солнечного затмения 10 июня 2021 г. Эффект солнечного затмения проявился в виде повышения амплитуды сигнала DHO с 10:21:36 до 12:25:30 UTC. Амплитуда повысилась в максимуме на 1,62 дБ (11:39:18 UTC). Эффект затмения проявился в виде повышения амплитуды радиосигнала JXN с 10:36:18 до 12:19:12 UTC. Амплитуда JXN повысилась в максимуме на 1,4 дБ (11:26:42 UTC). Выбранная методика может быть использована для описания обстоятельств солнечного затмения на элементах ОНЧ радиотрасс с пространственно-временным разрешением 400 км и 126 сек.

Регистрируемые во время солнечного затмения повышения амплитуд ОНЧ сигналов могут объясняться уменьшением высотного градиента концентрации электронов, повышением эффективной высоты волновода Земля – ионосфера вследствие быстрого уменьшения потока ионизирующего излучения солнца. На каждом из затененных участков радиотрассы нижняя ионосфера не успевает приобрести полностью ночные свойства вследствие быстрого окончания затмения и вновь начинающейся ионизации.

Для более детального исследования факторов, влияющих на распространение радиосигналов в волноводе Земля – ионосфера совместно с регистрацией вариаций амплитуды, необходимо привлекать измерения фазы, как наиболее чувствительного параметра ОНЧ сигналов.

Относительно малые затраты на изготовление синхронизируемых ОНЧ приемников, возможность охвата больших территорий сетью радиотрасс делают регистрацию вариаций параметров ОНЧ сигналов удобным инструментом для зондирования нижней ионосферы над труднодоступными и малонаселенными территориями. Результаты такого зондирования могут использоваться для корректировки моделей высокоширотной ионосферы.

Л и т е р а т у р а

1. Ионосферные возмущения в Восточно-Азиатском регионе : монография / Г. А. Жеребцов, Shi Jiankui, Н.П. Перевалова [и др.]. – Москва : Геос, 2021. – 338 с.
2. A. J. Coster, L. Goncharenko, S.-R. Zhang [et al.] (2017) ‘GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse’ *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 12,041–12,048.
3. Черняков, С. М. Экспериментальное определение эффективных коэффициентов рекомбинации в D-области ионосферы высоких широт во время солнечных затмений по данным метода частичных отражений / С. М. Черняков // Вестник МГТУ. – 2017. – Т. 20, – № 1-2. – С. 219–230.
4. Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы : монография / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – Москва : Наука, 1988. – 528 С.
5. Thomson, N.R., Clilverd, M.A., McRae, W.M. (2007) ‘Nighttime ionospheric D region parameters from VLF phase and amplitude’, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Issue A7, p. A07304.
6. Barr, R.D., Jones, L., Rodger, C.J (2000) ‘ELF and VLF radio waves’ *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 62, Issue 17-18, pp. 1689–1718.
7. Chakrabarti, S.K., Sasmal, S., Chakraborty, S. [et al.] (2018) ‘Modeling D-region ionospheric response of the Great American TSE of August 21, 2017 from VLF signal perturbation’ *Advances in Space Research*, 62(3), pp. 651–661.
8. Wang, X., Li, B., Zhao F. [et al.] (2021) ‘Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020: Observation and Analysis’ / *Sensors*, 21(4), p. 1216.
9. Clilverd, M.A., Rodger, C.J., Thomson N.R. [et al.] (2001) ‘Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling’ *Radio Science*, 36(4), pp. 773–788.
10. Kozlov, V.I., Karimov, R.R., Mullayarov, V.A. (2007) ‘Observation of signals of VLF radio stations and VLF noise during the solar eclipse on March 29, 2006’ *Russian Physics Journal*, 50(6), pp. 617–621.
11. Solovieva, M.S., Rozhnoi, A.A., Fedun, V., Schwingenschuh K. (2015) ‘Effect of the Total Solar Eclipse of March 20, 2015, on VLF/LF Propagation’ *Geomagnetism and Aeronomy*, 56(3), pp. 323–330.
12. Rozhnoi, A., Solovieva, M., Shalimov, S. [et al.] (2020) ‘The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals’ *Earth and Space Science*, 7(2), p. e2019EA000839.
13. Вариации амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций в период солнечного затмения 20 марта 2015 г. при регистрации в Якутске и Улан-Удэ / В. И. Козлов, А. А. Корсаков, Р. П. Каримов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 195–203.
14. Альперт, Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера : монография / Я. Л. Альперт. – [Изд. 2-е, переработанное и дополненное]. – Москва : Наука, 1972. – 564 с.
15. Каталог солнечных затмений. Кольцеобразное солнечное затмение 10 июня 2021 года : [сайт]. – Москва. – URL: https://www.secl.ru/eclipse_catalog/2021_6_10.html (дата обращения: 09.09.2021).
16. Обстоятельства затмения Солнца 10 июня 2021 г. ИПА РАН [сайт]. – Санкт-Петербург. – URL: <https://iaaras.ru/media/data/ae2021/20210610soa.txt> (дата обращения: 10.09.2021).
17. Дагаев, М. М. Солнечные и лунные затмения : монография / М. М. Дагаев. – Москва : Наука, 1978. – 208 с.
18. Моисеенко, Л. Н. Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения / Л. Н. Моисеенко, Р. С. Шубова // Известия вузов. Радиофизика. – 1978. – Т. XXI. – № 2. – С. 269–274.
19. Schlyter, P. Computing planetary positions – a tutorial with worked examples: – URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (Accessed: 12.09.2021).
20. Jacobsen, T. The Russian VLF time-signal stations, “Beta”: – URL: <http://www.vlf.it/russianvlf/russianvlf.htm> (Accessed: 12.09.2022).
21. Полетаев, А. С. Когерентное детектирование СДВ радиосигналов, распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Полетаев Александр Сергеевич. – Иркутск, 2019. – 217 с.
22. Thomson, N.R., Clilverd, M.A., Rodger, C.J. (2014) ‘Low-latitude ionospheric D region dependence on solar zenith angle’ *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, Issue 8, pp. 6865–6875.

23. HM Nautical Almanac Office [сайт]: <http://astro.ukho.gov.uk/eclipse/0232021/> (Accessed: 10.09.2021).
24. Lyakhov, A.N., Goncharov, E.S., Losseva, T.V. (2020) 'FDTD, FDFD, and mode sum methods for VLF-LF propagation in the lower ionosphere' *26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. SPIE, 2020, 11560, p. 115608S.

References

1. Ionospheric disturbances in the East Asian region: monograph / G. A. Zherebtsov, Shi Jiankui, N. P. Perevalova [i dr.]. – Moscow : Geos, 2021. – 338 p.
2. A. J. Coster, L. Goncharenko, S.-R. Zhang [et al.] (2017) 'GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse' *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 12,041–12,048.
3. Chernyakov, S. M. Experimental determination of effective recombination coefficients in the D-region of the high-latitude ionosphere during solar eclipses according to the partial reflection method / S. M. Chernyakov // *Bulletin of MSTU*. – 2017. – T. 20, – No. 1-2. – Pp. 219–230.
4. Brunelli, B. E. Physics of the ionosphere : monograph / B. E. Brunelli, A. A. Namgaladze. – Moscow : Nauka, 1988. – 528 p.
5. Thomson, N. R. Nighttime ionospheric D region parameters from VLF phase and amplitude / N. R. Thomson, M. A. Clilverd, W. M. McRae // *Journal of Geophysical Research : Space Physics*. – 2007. – Issue A7. – P. A07304.
6. Barr, R. ELF and VLF radio waves / R. Barr, D. L. Jones, C. J. Rodger // *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*. – 2000. – V. 62. – Issue 17-18. – Pp. 1689–1718.
7. Modeling D-region ionospheric response of the Great American TSE of August 21, 2017 from VLF signal perturbation / S. K. Chakrabarti, S. Sasmal, S. Chakraborty [et al.] // *Advances in Space Research*. – 2018. – V. 62. – No 3. – Pp. 651-661.
8. Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020 : Observation and Analysis / X. Wang, B. Li, F. Zhao [et al.] // *Sensors*. – 2021. – V. 21. – No 4. – P. 1216.
9. Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling / M. A. Clilverd, C. J. Rodger, N. R. Thomson [et al.] // *Radio Science*. – 2001. – V. 36. – No 4. – Pp. 773–788.
10. Kozlov, V. I. Observation of signals of VLF radio stations and VLF noise during the solar eclipse on March 29, 2006 / V. I. Kozlov, R. R. Karimov, V. A. Mullayarov // *Russian Physics Journal*. – 2007. – V. 50. – No 6. – Pp. 617–621.
11. Effect of the Total Solar Eclipse of March 20, 2015, on VLF/LF Propagation / M. S. Solovieva, A. A. Rozhnoi, V. Fedun, K. Schwingenschuh // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2016. – V. 56. – No 3. – Pp. 323–330.
12. The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals / A. Rozhnoi, M. Solovieva, S. Shalimov [et al.] // *Earth and Space Science*. – 2020. – V. 7. – No 2. – P. e2019EA000839.
13. Variations in the amplitude and phase of signals from VLF radio stations during the solar eclipse of March 20, 2015 during registration in Yakutsk and Ulan-Ude / V. I. Kozlov, A. A. Korsakov, R. R. Karimov [and others] // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. – 2016. – T. 13. – No. 4. – Pp. 195–203.
14. Alpert, Ya. L. Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere: monograph / Ya. L. Alpert. – [Ed. 2nd, revised and enlarged]. – Moscow : Nauka, 1972. – 564 p.
15. Catalog of solar eclipses. Annular solar eclipse June 10, 2021: [website]. – Moscow. – URL: https://www.secl.ru/eclipse_catalog/2021_6_10.html (date of access: 09/09/2021).
16. Circumstances of the solar eclipse on June 10, 2021. IAA RAS [website]. – Saint Petersburg. – URL: <https://iaaras.ru/media/data/ae2021/20210610soa.txt> (date of access: 09/10/2021).
17. Dagaev, M. M. Solar and lunar eclipses: monograph / M. M. Dagaev. – Moscow : Nauka, 1978. – 208 p.
18. Moiseenko, L. N. Change in the effective height of the ionosphere during a solar eclipse / L. N. Moiseenko, R. S. Shubova // *Izvestiya vuzov (Universities Bulletin). Radiophysics*. – 1978. – T. XXI. – No. 2. – Pp. 269–274.

19. Schlyter, P. Computing planetary positions - a tutorial with worked examples. – URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (date of access: 09/12/2021).

20. Jacobsen, T. The Russian VLF time-signal stations, “Beta”. – URL: <http://www.vlf.it/russianvlf/russianvlf.htm> (date of access: 09/12/2022).

21. Poletaev, A. S. Coherent detection of VLF radio signals propagating in the Earth-ionosphere waveguide: dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences: 01.04.03 / Poletaev Alexander Sergeevich. – Irkutsk, 2019. – 217 p.

22. Thomson, N. R. Low-latitude ionospheric D region dependence on solar zenith angle / N. R. Thomson, M. A. Clilverd, C. J. Rodger // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – V. 119. – Issue 8. – P 6865 – 6875.

23. HM Nautical Almanac Office [web-site]. URL: <http://astro.ukho.gov.uk/eclipse/0232021/> (date of access: 09/10/2021).

24. Lyakhov, A. N. FDTD, FDFD, and mode sum methods for VLF-LF propagation in the lower ionosphere / A. N. Lyakhov, E. S. Goncharov, T. V. Losseva // *26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. – SPIE. – 2020. – V. 11560. – P. 115608S.

КОРСАКОВ Алексей Анатольевич – м. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: korsakov84@yandex.ru

KORSAKOV, Alexey Anatolievich – Research Assistant, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

СОКРУТ Надежда Алексеевна – ст. преп. кафедры иностранных языков по техническим и естественным специальностям, ИЗФир СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: ndsokrut@mail.ru

SOKRUT, Nadejda Alekseevna – Senior teacher, Department of Foreign Languages for Technical and Natural Sciences, Institute of Modern Languages and International Studies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.