

## ЭФФЕКТЫ ВЗРЫВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА 15.02.2013 В ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ ОНЧ-РАДИОСИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В ЯКУТСКЕ И УЛАН-УДЭ

<sup>1</sup>В.И. Козлов, <sup>1</sup>В.А. Муллаяров, <sup>1</sup>А.А. Корсаков, <sup>1</sup>Р.Р. Каримов, <sup>1</sup>С.Е. Кобякова,  
<sup>2</sup>Ю.Б. Башкуев, <sup>2</sup>Г.Б. Номинов

## EFFECTS OF CHELYABINSK METEOROID EXPLOSION ON 15 FEBRUARY 2013 IN VARIATIONS OF PARAMETERS OF VLF RADIO SIGNALS RECORDED IN YAKUTSK AND ULAN-UDE

<sup>1</sup>V.I. Kozlov, <sup>1</sup>V.A. Mullayarov, <sup>1</sup>A.A. Korsakov, <sup>1</sup>R.R. Karimov, <sup>1</sup>S.E. Kobyakova,  
<sup>2</sup>Yu.B. Bashkuyev, <sup>2</sup>G.B. Nominov

Приводятся данные о вариациях амплитуды и фазы сигналов (14.88 кГц) станций, расположенных под Краснодаром, Новосибирском и Хабаровском, регистрируемых в Якутске и Улан-Удэ 15 февраля 2013 г. во время взрыва Челябинского метеороида. Вариации фазы сигнала ст. Краснодар по данным регистраторов в Якутске и Улан-Удэ с 04:00 до 09:00 UT 15 февраля 2013 г. составили 20° и 15°, что, возможно, является эффектом, вызванным взрывом метеороида. В предположении влияния взрыва небесного тела на параметры нижней (60–90 км) ионосферы на основе синхронной регистрации сигналов радиостанции Краснодар в Якутске и Улан-Удэ проведена оценка размера области возмущения нижней ионосферы. Поперечный размер области составил не менее 610 км, а продольный – не более 1400 км.

We present data on amplitude and phase variations of signals (14.88 kHz) of stations located near Krasnodar, Novosibirsk and Khabarovsk, and recorded in Yakutsk and Ulan-Ude on 15 February 2013 during Chelyabinsk meteoroid explosion. Phase variations of Krasnodar station signal, according to data of Yakutsk and Ulan-Ude recorders, from 04:00 to 09:00 UT on 15 February 2013, were 20° and 15° that seemed to be the meteoroid explosion effects. On the basis of synchronic recording of Krasnodar signal in Yakutsk and Ulan-Ude, and under suggestion of the impact of celestial body on the low (60–90 km) ionosphere parameters, we estimated the size of the low ionosphere disturbance region. For this region, cross sectional and axial dimensions were 610 and 1400 km, respectively.

### Введение

Известно воздействие метеорных потоков на плазму ионосферы [Ловелл, 1950]. Считается, что оно проявляется, как правило, в интенсивном развитии спорадических слоев Es в области вторжения потоков метеоров в верхнюю атмосферу. Событие, связанное с падением метеорита 15.02.2013 г. в 03:20 UT вблизи Челябинска, показало, что крупные метеориты, возможно, вызывают возмущения во всей толще ионосферы (даже в слое F2), а не только на высотах спорадического слоя Es [Гвишвили и др., 2013; Тertyshnikov и др., 2013]. Взрыв метеороида произошел на высоте 32 км (54.8° N, 61.1° E) [Данилкин и др., 2013]. Высота максимальной яркости 23.3 км [Емельяненко и др., 2013]. Метеороид двигался вдоль широты с небольшим отклонением к северу (азимут 290°) под углом к горизонту около 20°. Гелиогеофизическая обстановка, предшествовавшая падению метеорита, была спокойной. Индекс солнечной активности  $F_{10.7}$  не превышал 105, число солнечных пятен  $R_z=38$  [Данилкин и др., 2013]. Эффекты от падения метеороида проявились во многих геосферах [Тertyshnikov и др., 2013]. В работе [Berngardt et al., 2013] отмечаются ионосферные эффекты на высотах E-слоя, в широкой области, достаточной для влияния на трассы распространения сигналов очень низкочастотного диапазона (ОНЧ, 3–30 кГц) Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ.

### Методика

Электромагнитные сигналы ОНЧ-диапазона способны распространяться на большие расстояния в волноводном канале. Нижней стенкой волновода является водная среда или земля, обладающая достаточной проводимостью, верхней границей служит

нижняя ионосфера (высота днем 60–90 км, ночью 90–110 км). В качестве источников радиоизлучения широко используются навигационные ОНЧ-радиостанции. В Якутске с 2009 г. организована регистрация сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20). С августа 2012 г. регистрируются сигналы РСДН-20 в Улан-Удэ. Используются сигналы передающих станций, расположенных вблизи Новосибирска, Хабаровска и Краснодара. Каждая из станций последовательно излучает импульсы на частотах 11.904, 12.649 и 14.88 кГц. Цикл импульсного излучения составляет 3.6 с. Длительность посылки каждого импульса равна 0.4 с при паузе между сигналами 0.2 с, что исключает возможность перекрытия сигналов разных станций в любой точке рабочей зоны [Болошин и др., 2001]. В промежутках между импульсами радионавигационных сигналов на тех же частотах регистрируется радишум. Сигнал принимается на электрическую штыревую антенну высотой 4 м, затем, после предварительного усиления (коэффициент усиления 40), поступает на вход 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя АЦП3000. 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 E). В часах используется как долговременная (по сигналам спутников GPS), так и короткопериодическая (от качественного кварцевого генератора) стабилизация. Точность секундного импульса (PPS) составляет UTC±50 нс, а точность гармонического сигнала (10 МГц) –  $1.16 \times 10^{-12}$  после суток работы (три сигма). Внешняя частота дискретизации 2.5 МГц для АЦП получается делением синхронизированного гармо-

нического сигнала GPS-часов (10 МГц) переходным устройством GPS2500, изготовленным НПГ «R-Technology». Оцифрованный сигнал подается на ноутбук с программой регистрации, разработанной в ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН. Данная программа осуществляет выделение (с помощью решетчатых функций преобразования Фурье) амплитуды и фазы на трех частотах сигналов РСДН-20 и запись данных на диск. Окно выборки составляет 2.688 мс. Это значение подбиралось так, чтобы, с одной стороны, в окне укладывалось целое число периодов каждой частоты, а с другой – сохранялось необходимое частотное разрешение. Предварительно формируется табличный массив значений тригонометрических функций для быстрого преобразования Фурье, который используется во время регистрации, что существенно ускоряет процесс обработки. В сформированном окне вычисляются амплитуда и фаза для трех частот, далее полученные значения усредняются в каждой записи отдельно для каждой частоты. Окно составляет сорок периодов для частоты 14.88 кГц, что позволяет избавиться от наложения импульсов разной частоты друг на друга во время анализа Фурье. Таким образом производятся регистрация и запись на диск амплитуды и фазы сигналов с временным разрешением 2.688 мс.

На рис. 1 показаны трассы распространения радиосигналов ст. Краснодар, Новосибирск и Хабаровск. Трасса Краснодар–Якутск протяженностью 5725 км проходит на 377 км северней Челябинска (области взрыва метеороида). Трасса Краснодар–Улан-Удэ протяженностью 4960 км проходит на 232 км южнее области взрыва. Трассы Новосибирск–Якутск (протяженность 2640 км), Новосибирск–Улан-Удэ (протяженность 1560 км) проходят восточнее области взрыва более чем на 1400 км, а трасса Хабаровск–Якутск (протяженность 1400 км) – более чем на 4000 км.

## Результаты

Проанализированы вариации (усредненных за 3 мин синхронно в одни интервалы) значений фазы и амплитуды радиосигнала ст. Краснодар (14.88 кГц), регистрируемых в Якутске и в Улан-Удэ 15 февраля 2013 г. На рис. 2 представлены отклонения фазы (а) и амплитуды (б) сигнала 15 февраля относительно усредненных (медианных) значений за февраль 2013 г. по данным регистратора в Якутске.

Кроме того, на рис. 2 представлены отклонения фазы и амплитуды сигнала 15 февраля (данные регистратора в Улан-Удэ) относительно геофизически невозмущенных суток (13.02.2013) и приведены оценки статистических погрешностей, полученные на основе 25%-го и 75%-го квартилей. По данным регистратора в Якутске 15 февраля 2013 г. обнаружены значимые отклонения фазы от февральских медианных значений. Отклонения с 04:00 до 06:00 UT в максимуме составили 20° (05:00 UT). Отклонения значимы, так как выходят за пределы квартильных погрешностей. На рисунке выделяются также значимые отклонения фазы в более поздние часы 10:00–15:00 UT, в максимуме они составляют 25° (13:00 UT).



Рис. 1. Трассы распространения сигналов радиостанций Краснодар, Новосибирск и Хабаровск.

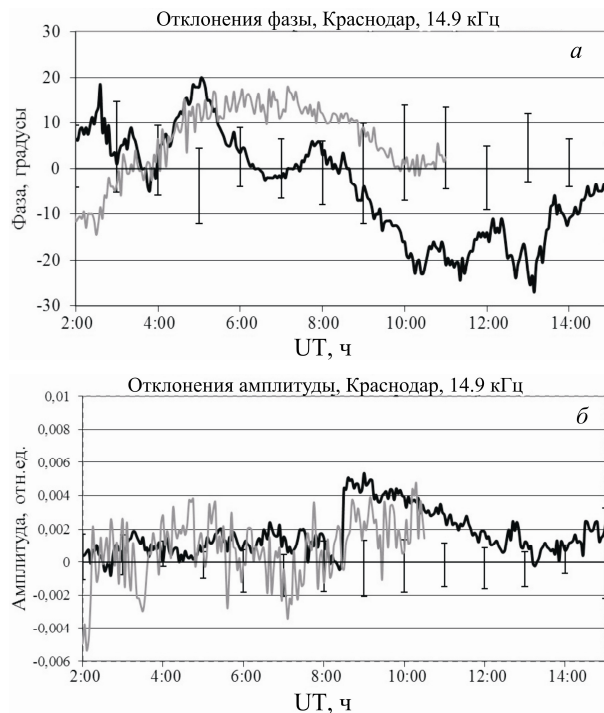


Рис. 2. Отклонения фазы (а) и амплитуды (б) сигнала радиостанции Краснодар (14.88 кГц) 15 февраля 2013 г.: черная кривая – относительно усредненных (медианных) значений за февраль, регистрируемых в Якутске; серая кривая – относительно значений за 13 февраля (геофизически невозмущенные сутки), регистрируемых в Улан-Удэ.

Наблюдаемые по данным регистратора в Улан-Удэ с 04:00 до 09:00 UT отклонения фазы относительно значений за 13 февраля (невозмущенные сутки,  $K_p \leq 3$ ) составили 15°. По данным регистраторов в обоих пунктах изменения суточного хода амплитуды (рис. 2, б) в дневных условиях не превышают статистических погрешностей. Отклонения амплитуды от среднемесячных значений в период 08:30–12:00 UT по данным регистратора в Якутске связаны с прохождением вечернего терминатора по трассе Краснодар–Якутск. Данный эффект, в различное время присутствующий для каждого индивидуальных суток, исчезает при медианном усреднении амплитуды. С 11:00 UT 15 февраля (рис. 2) регистрация амплитуды и фазы сигнала, принимаемого станцией в Улан-Удэ, прервана по техническим причинам.

На рис. 3 приведены отклонения фазы радиосигнала ст. Новосибирск (14.88 кГц) 15 февраля 2013 г. относительно усредненных (медианных) значений за февраль по данным якутского регистратора. Значимые отклонения проявляются с 12:00 до 15:00 UT и в максимуме составляют 35° (14:00 UT).

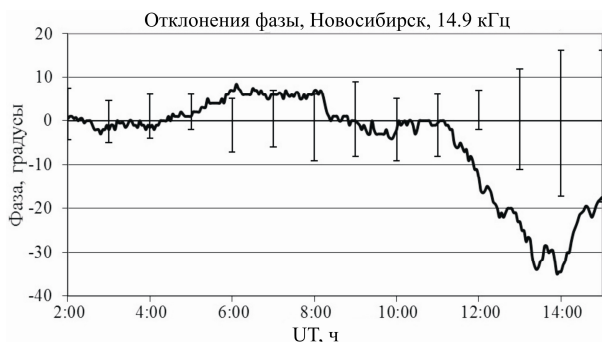


Рис. 3. Отклонения фазы радиосигнала (кривая) ст. Новосибирск (14.88 кГц) 15 февраля 2013 г. относительно усредненных значений за февраль по данным регистратора в Якутске.

На рис. 4 представлены отклонения фазы радиосигнала ст. Хабаровск (14.88 кГц) 15 февраля 2013 г. относительно усредненных (медианных) значений за февраль по данным якутского регистратора. Значимые отклонения проявляются с 11:00 до 13:00 UT и в максимуме составляют  $13^\circ$  (12:00 UT).

### Обсуждение

Рассмотренные по данным регистраторов в Якутске и Улан-Удэ вариации фазы сигнала ст. Краснодар (14.88 кГц) с 04:00 до 09:00 UT 15 февраля 2013 г., возможно, спровоцированы взрывом Челябинского метеороида. Мощный взрыв небесного тела мог привести к возмущениям дневной нижней ионосферы (высота 60–90 км) и повлиять тем самым на распространяющиеся в волноводном канале земля – ионосфера ОНЧ-радиосигналы, трассы которых проходили неподалеку от эпицентра взрыва. Отсутствие эффектов в амплитуде радиосигналов объясняется большим удалением регистраторов от передатчика, соответственно, малым соотношением сигнал/шум в обоих приемных пунктах и меньшей чувствительностью данного параметра к изменениям геофизических условий.

Исходя из геометрии трасс Краснодар–Якутск, Краснодар–Улан-Удэ (см. рис. 1), оценив размеры первых зон Френеля, можно провести оценку размеров области возмущения ионосферы. Радиус первой зоны Френеля, в направлении перпендикулярном направлению распространения волны, определяется выражением [Черный, 1972]

$$b_1 = \sqrt{\frac{l_1 l_2 \lambda}{l_1 + l_2}}, \quad (1)$$

где  $b_1$  – радиус первой зоны Френеля,  $\lambda$  – длина волны,  $l_1$  – расстояние от передатчика до точки определения зоны Френеля,  $l_2$  – расстояние от этой точки до приемника. На трассах в точке, ближайшей к области взрыва метеороида при распространении сигнала 14.88 кГц,  $b_1=159$  км. С учетом удаленности дуг Краснодар–Якутск (377 км) и Краснодар–Улан-Удэ (232 км) от места взрыва, поперечный размер области возмущения нижней ионосферы составляет не менее 610 км в предположении, что область воздействия ограничена первой зоной Френеля.

Более поздние (10:00–15:00 UT) отклонения фазы сигнала на трассе Краснодар–Якутск (рис. 2, а) не могут являться эффектом от взрыва метеороида,

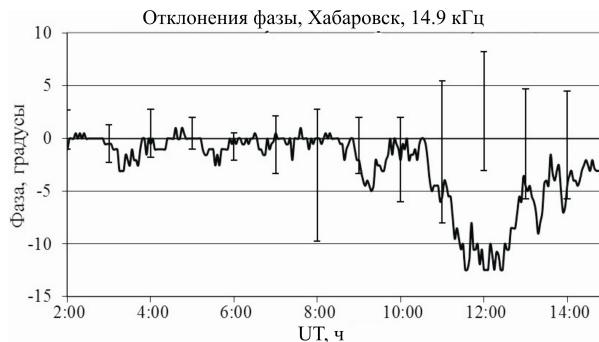


Рис. 4. Отклонения фазы радиосигнала (кривая) ст. Хабаровск (14.88 кГц) 15 февраля 2013 г. относительно усредненных значений за февраль по данным регистратора в Якутске.

Критическая частота ( $f_oEs$ ) слоя Es ионосферы 15 февраля 2013 г.

Время (UT)	$f_oEs$ (МГц) ст. Хабаровск [ <a href="http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/iono_month/201302_Khabarovsk_iono.txt">http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/iono_month/201302_Khabarovsk_iono.txt</a> ]	$f_oEs$ (МГц) ст. Якутск
02	4.5	1.9
03	–	2.1
04	–	2.1
05	–	2.5
06	–	2.4
07	–	1.9
08	–	–
09	–	–
10	–	–
11	3.2	3.3
12	3.6	–
13	–	–
14	–	–
15	–	–

поскольку в условиях ночного распространения схожие отклонения фазы радиосигнала присутствуют на трассах Новосибирск–Якутск (12:00–15:00 UT, рис. 3) и Хабаровск–Якутск (11:00–13:00 UT, рис. 4), находящихся на большом расстоянии от места взрыва. Область взрыва метеорита находится западнее, на расстоянии более чем 1400 км от радиостанции Новосибирск. Отклонения фазы в 10:00–15:00 UT и около 00:02 UT могут быть связаны с локальными возмущениями в восточных частях трасс, проходящих в Es-слое ионосферы, влияющими на ночное распространение сигналов ОНЧ-диапазона. Данные о критических частотах  $f_oEs$  представлены в таблице.

### Заключение

Вариации фазы сигнала ст. Краснодар (14.88 кГц) по данным регистраторов в Якутске и Улан-Удэ с 04:00 до 09:00 UT 15 февраля 2013 г., возможно, являются эффектами от взрыва Челябинского метеороида. Мощный взрыв мог вызвать возмущения дневной нижней ионосферы (60–90 км), область которой влияет на распространяющиеся в волноводном канале ОНЧ-радиосигналы.

На основе синхронной регистрации сигналов радиостанции Краснодар в Якутске и Улан-Удэ проведена оценка размера области возможного возмущения нижней ионосферы. Поперечный размер области возмущения составил не менее 610 км. Оценка

продольного размера области может быть сделана по данным, полученным на трассе Новосибирск–Якутск, на которой возмущений не выявлено (начало трассы удалено от места падения метеорита на 1400 км.)

Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 14-05-31056 мол\_а и НОФМУ РС(Я) № 01-018.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болошин С.Б., Кабиров А.И., Писарев С.Б., Семенов Г.А. Фазовая радионавигационная система диапазона СДВ. Возможности и перспективы. // Навигация и гидрография. 2001. № 12. С. 99–106.

Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В. и др. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311.

Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Лапшин В.Б. К вопросу о состоянии ионосферы после пролета Челябинского метеороида // *Гелиогеофизические исследования [электронный журнал]*. 2013. № 5. С. 54–59.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277.

Ловелл Л. Метеорная ионизация и ионосферные аномалии // *УФН*. 1950. Т. 41, № 9. С. 9–43.

Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В. и др. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // *Гелиогеофизические исследования [электронный журнал]*. 2013. № 4. С. 16–23.

Черный Ф.Б. Распространение радиоволн: Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Советское радио, 1972. 464 с.

Berngardt O.I., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A., et al. Ionospheric effects during first 2 hours after the Chelyabinsk meteorite impact // <http://arxiv.org/pdf/1308.3918v1.pdf>. Submitted 19 Aug 2013.

[http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/iono\\_month/201302\\_Khabarovsk\\_iono.txt](http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/iono_month/201302_Khabarovsk_iono.txt).

<sup>1</sup>*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафара СО РАН, Якутск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия*