

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.872.32

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЗАМИРАНИЙ РАДИОВОЛН
НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ В ВОЛНОВОДЕ “ЗЕМЛЯ–ИОНОСФЕРА”
ПОД ВЛИЯНИЕМ СИЛЬНОГО ЛОКАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ
В АТМОСФЕРЕ

© 2022 г. А. В. Мошков*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

**E-mail: kuzaf@inbox.ru*

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 22.10.2021 г.

Принята к публикации 24.12.2021 г.

Проведены численные расчеты продолжительности крупномасштабных замираний электромагнитных волн с частотами 1–10 кГц при прохождении плоского неоднородного слоя нижней ионосферы в присутствии сильного локального возмущения атмосферы. Использована модель возмущения в виде точечного источника энергии. Найдено, что параметры модели зависят всего от двух начальных величин: высоты h_0 и энергии. Показано, что при $h_0 < 50$ км продолжительность замираний не превышает 2 мин, при увеличении h_0 выше некоторого критического значения горизонтальный размер возмущения существенно уменьшается, что приводит к уменьшению времени затухания радиоволн до десятков секунд при $h_0 > 80$ км.

DOI: 10.31857/S0033849422110109

ВВЕДЕНИЕ

Радиоволны диапазона очень низких частот широко используются в системах наземной дальней и сверхдальней радиосвязи, навигации, передачи сигналов эталонных частот и единого времени. Все чаще начинает использоваться диапазон крайне низких частот вплоть до частот от единиц до сотен герц. Преимущества низкочастотных (НЧ) систем связи очевидны: стабильность сигнала по частоте и фазе, относительно слабое затухание на длинных трассах, практическое отсутствие помех искусственного происхождения, слабая чувствительность к особенностям рельефа и метеоусловиям на трассе. Основным источником шумов на низких частотах — электромагнитные импульсы молниевых разрядов, которые сосредоточены главным образом в экваториальном поясе. Статистические характеристики таких шумов достаточно хорошо изучены. В приполярных областях особую роль играют геомагнитные возмущения, которые могут нарушить работу НЧ-линии связи вплоть до временного полного прекращения ее функционирования [1].

Источниками заметных локальных возмущений атмосферы являются, кроме упомянутых выше молниевых разрядов, высыпания энергичных частиц радиационных поясов [2], излучение

мощных наземных НЧ-передатчиков; вторжение крупных метеоров или комет [3]. Например, средний молниевый разряд сопровождается выделением энергии $\sim 10^9$ Дж в течение 0.1–0.2 мс. Из этой энергии около 10^6 Дж переходит в энергию электромагнитного импульса, максимум спектра которого приходится на частоты 5–10 кГц. В среднем за одну секунду происходит около 50 молниевых разрядов, которые суммарно выделяют энергию $\sim 5 \times 10^{10}$ Дж. Такой разряд может индуцировать высыпания энергичных частиц радиационных поясов в нижнюю ионосферу, что приводит к заметному увеличению концентрации свободных электронов в областях с горизонтальным размером до нескольких сотен километров [2].

Из крупных метеоритных тел, зафиксированных на территории РФ за последние примерно 100 лет, отметим Тунгусский метеорит с энергией ~ 200 ПДж (1 петаджоуль равен 10^{15} Дж) и Сихотэ-Алинский метеорит с энергией ~ 0.1 ПДж [3].

Считаем подобного рода возмущения атмосферы сильными и локальными, если они приводят к увеличению ионизации (концентрации свободных электронов) окружающей среды на несколько порядков величины в области пространства, характерные размеры которой сравнимы с длиной НЧ-волны, т.е. составляют десятки или сотни кило-

метров. Особенности распространения радиоволн высокой частоты в присутствии таких возмущений были рассмотрены ранее [4].

Цель данной работы – оценить время ослабления НЧ-сигнала при его распространении в волноводе “Земля–ионосфера” в присутствии сильного локального возмущения атмосферы, возникшего ниже ионосферы. В качестве модели такого возмущения используем простейшую регулярную (без учета тепловых эффектов и турбулентности) модель, описывающую в газодинамическом приближении поведение облака сильно ионизированной плазмы, образовавшегося после быстрого (секунда и менее) точечного выделения большого количества энергии в интервале значений $\sim 0.1\text{--}10$ ПДж [4]. Эта модель позволяет выявить особенности распространения НЧ-волн через возмущенную нижнюю ионосферу при помощи изменения всего двух начальных параметров – энергии Q и высоты h_0 . В работе рассмотрены сверхдлинные радиоволны в интервале частот $1\text{--}10$ кГц (длины волн $30\text{--}300$ км). Оценки проводятся на основе численных расчетов затухания НЧ-волны в неоднородном слое нижней ионосферы, параметры которого модифицируются всплывающей областью повышенной ионизации.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используем простейшую модель распространения НЧ-волн в волноводе “Земля–ионосфера”, которая рассматривает промежуток между поверхностью земли и нижней ионосферой как волновод, в котором сигнал, распространяющийся от источника, представляется в виде набора лучей (локальных плоских волн), попадающих в приемник после последовательных отражений от земли и ионосферы. После суммирования всех подобных лучей получим полный принимаемый сигнал. Такая процедура получила название “метод многократно отраженных волн” или “метод скачков” [5, 6]. В рамках этого метода для оценок ослабления волны достаточно рассмотреть только локальные области отражений в ионосфере и на поверхности земли. Метод скачков дает удовлетворительные результаты в случае распространения НЧ-волн в волноводе “Земля–ионосфера” вплоть до расстояний несколько тысяч километров. Ограничение дальности связано в первую очередь с увеличением числа суммируемых лучей в ночное время.

Рассмотрим слой нижней ионосферы между высотами 50 и 150 км. Можно считать, что для возможных гео- и гелиофизических условий именно этот слой вносит основной вклад в коэффициенты отражения и поглощения волны [7, 8]. Выше этого слоя ионосферу можно считать плавно меняющейся средой, а эффективная частота соударений электронов, ответственная за погло-

щение, становится пренебрежимо малой. Запишем известное выражение для коэффициента затухания δ в плазме [7]:

$$\delta \approx 4.6 \times 10^{-2} N_e v_e / (\omega^2 + v_e^2), \quad (1)$$

где δ измеряется в дБ/км; N_e – концентрация свободных электронов, см^{-3} ; v_e – эффективная частота соударений электронов, с^{-1} ; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота волны, с^{-1} . В ионосфере выше ~ 80 км выполняется условие $\omega^2 \gg v_e^2$ и справедливо часто используемое приближение

$$\delta \approx 1.3 \times 10^{-4} N_e v_e \lambda^2, \quad (2)$$

где длина волны λ измеряется в метрах.

Плотность атмосферы экспоненциально растет с уменьшением высоты. На высотах менее ~ 60 км становится справедливым неравенство $\omega^2 \ll v_e^2$, и, соответственно, соотношение (1) примет вид

$$\delta \approx 4.6 \times 10^{-2} N_e / v_e. \quad (3)$$

Основное физическое упрощение, лежащее в основе оценок длительности замираний сигнала, состоит в предположении, что максимальное выделение энергии возмущения происходит практически мгновенно. Это порождает ряд сложных переходных процессов в атмосфере, продолжительность которых составляет примерно 1 с, после чего такое возмущение можно считать результатом точечного мгновенного выделения в атмосферу некоторой энергии Q .

В результате формируется область горячей сильно ионизированной плазмы (“облако”). Под действием архимедовой силы облако начинает подниматься вверх практически с постоянной скоростью и достигает верхней границы волновода, модифицируя ее параметры. Примерно через 3 мин от начала возмущения облако покидает волновод и более не оказывает воздействия на характеристики распространения НЧ-волн. Максимальная величина ионизации определяется в основном начальным количеством молекул воздуха в облаке. В атмосфере (включая ионосферу) эта ионизация чрезвычайно велика – любой радиосигнал испытает при прямом прохождении через область возмущения “абсолютное” ослабление [4]. Однако в случае низких частот размеры облака в волноводе существенно меньше длины волны, поэтому до достижения нижней ионосферы область повышенной ионизации не может оказать заметного влияния на характеристики радиосигнала. Отметим, что для высоких частот вывод о малом затухании волн в атмосфере нарушается, как только начинает выполняться условие $\omega > v_e$ [4].

Задача ставится следующим образом. Пусть на высоте h_0 над поверхностью земли в условный момент времени $t = 0$ происходит мгновенное то-

чечное выделение энергии Q . По мере всплытия облако ионизации модифицирует параметры плазмы в слое нижней ионосферы. Следует определить результирующую зависимость от времени ослабления НЧ-волны в этом слое, расположенном на высотах 50–150 км над поверхностью земли. Для моделирования движения облака используем модель [4], которая подверглась незначительной модификации: зависимости параметров невозмущенной атмосферы от высоты приведены в соответствие с моделью стандартной атмосферы [9]. Для невозмущенной ионосферы используем эмпирические модели, соответствующие равноденственному сезону при средней активности Солнца [10]. Время амплитудных замираний волны определяем при помощи численного интегрирования коэффициента затухания (1) по высоте.

Предполагаем, что область отражения волн в методе скачков и область возмущения в нижней ионосфере приблизительно совпадают. По этой причине сделанные ниже оценки длительности замираний сигнала носят характер оценок сверху.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При увеличении времени t облако возмущения всплывает в атмосфере приблизительно с постоянной скоростью. При увеличении Q эта скорость возрастает: в интервале $Q \sim 0.1$ –10 ПДж она лежит в интервале 0.4–0.9 км/с. На рис. 1 приведены результаты расчетов величины A затухания волны в зависимости от времени для дневной ионосферы.

На рисунке виден характерный ход кривой $A(t)$: до момента времени ~ 65 с затухание в слое соответствует невозмущенной ионосфере (~ -0.75 дБ). С приходом возмущения затухание начинает резко расти до величины ~ -21 дБ ($Q = 4$ ПДж, высота центра облака ~ 87 км). При дальнейшем подъеме в слое концентрация электронов и температура в облаке уменьшаются и затухание медленно спадает. Наконец, с выходом облака из слоя ослабление в последнем быстро возвращается к исходной фоновой величине.

Основные параметры возмущения формируются в той точке, где это возмущение произошло, и эти параметры практически не зависят от времени суток, сезона и солнечной активности. Поэтому для ночной ионосферы картина затухания будет полностью идентичной рис. 1, за исключением величины начального ослабления в ионосфере (~ -0.03 дБ). Для $Q = 4$ ПДж затухание в максимуме $A(t)$ составит приблизительно -20.2 дБ ночью и -21 дБ днем. Временные параметры кривой $A(t)$ не меняются. По этой причине везде далее приводим результаты для дневной модели ионосферы.

Вычислим длительность Δt затухания волны под влиянием возмущения. Для этого выберем условный уровень 3 дБ под невозмущенным зна-

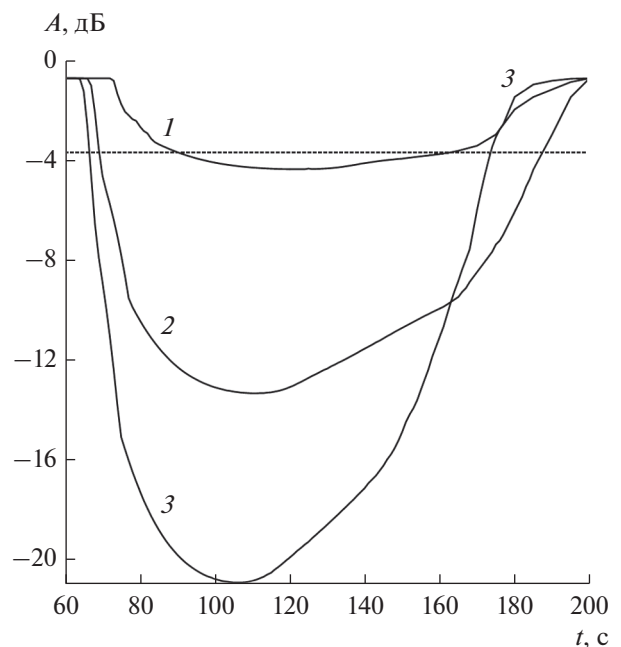


Рис. 1. Зависимость величины A затухания в дневной нижней ионосфере от времени для частоты 10 кГц и $h_0 = 1$ км при $Q = 0.4$ (1), 2 (2) и 4 ПДж (3); горизонтальная штриховая прямая обозначает величину на 3 дБ больше фонового затухания в ионосфере.

чением (см. рис. 1). Для $Q = 2$ и 4 ПДж получим $\Delta t \approx 115$ и 110 с, т.е. приблизительно 2 мин.

Говорить о затухании НЧ-волны имеет смысл в том случае, если размер области возмущения сравним или превышает длину волны. Для $Q = 4$ ПДж горизонтальный размер возмущения D , соответствующий максимуму затухания, имеет порядок величины 100 км. Однако следует учесть, что показатель преломления НЧ-волны в ионосфере заметно растет с высотой вместе с ростом величины N_e . С ростом частоты он, напротив, уменьшается как $f^{-1/2}$ [7]. Для качественных оценок можно считать, что в интервале частот 1...10 кГц “средний” показатель преломления в невозмущенной ионосфере равен 5–10. Соответственно, длины волн в свободном пространстве следует делить на эту величину.

На высоте расположения центра облака, соответствующей максимуму затухания волны (~ 87 км), значения N_e ($\sim 8 \times 10^9$ см $^{-3}$) и v_e ($\sim 9 \times 10^7$ с $^{-1}$) велики относительно невозмущенных ионосферных величин на этой высоте ($\sim 6 \times 10^3$ см $^{-3}$ и $\sim 7 \times 10^5$ с $^{-1}$). По этой причине приближение (3) выполняется с большим запасом на всем интервале используемых частот. В выражении (3) отсутствует зависимость коэффициента затухания от частоты. Косвенно зависимость от частоты присутствует в самой задаче через параметр D/λ . Учет этого обстоятельства требует решения задачи о распро-

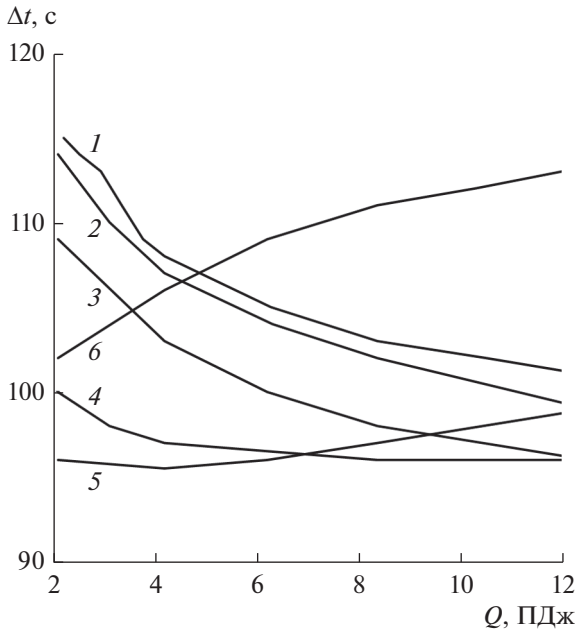


Рис. 2. Зависимость времени замираний сигнала от начальной энергии Q при $h_0 = 1$ (1), 5 (2), 10 (3), 20 (4), 30 (5) и 40 км (6).

странении НЧ-радиоволн в волноводе “Земля–ионосфера” в присутствии сильного локального возмущения. Это не входит в цели данной работы. Поэтому в первом приближении считаем, что частотная зависимость отсутствует, и все дальнейшие результаты приведены для частоты 10 кГц.

Пусть A_m – максимум затухания на кривой $|A(t)|$ и D_m – соответствующий горизонтальный размер возмущения. Эти величины монотонно растут с ростом энергии Q . Если рассматривать данные численного моделирования как “эмпирические”, то для $Q > 0.1$ ПДж и начальных высот $h_0 \leq 10$ км с корреляцией не хуже 0.996 можно получить следующие приближения:

$$A_m(Q) = \alpha + \beta Q^{1/2}, \quad (4)$$

$$\alpha = -4.22 - 0.863h_0; \quad \beta = 7.43 + 4.46h_0,$$

$$D_m(Q) = \zeta + \xi Q^{1/4}, \quad (5)$$

$$\zeta = 4.59 - 0.419h_0; \quad \xi = 64.1 + 4.08h_0,$$

где Q измеряется в ПДж; A_m – в дБ; D_m и h_0 – в км.

“Мягкие” монотонные зависимости параметров возмущения и характеристик НЧ-волн от величины Q определяются тем, что при возникновении облака ионизации максимальные величины N_e , v_e и температуры частиц в нем не могут расти беспредельно с увеличением Q и определяются состоянием атмосферы в точке начала возмущения. Зависимости от параметра h_0 имеют более сложный характер (см. ниже). По этой причине

простые линейные выражения для коэффициентов в соотношениях (4), (5) ограничены высотой 10 км.

На рис. 2 приведены зависимости длительности Δt замираний НЧ-сигнала от величины Q для ряда начальных высот h_0 . Из рисунка видно, что для высот $h_0 < 30$ км величина Δt убывает с ростом начальной энергии Q для заданной величины h_0 . Это связано, главным образом, с увеличением средней скорости всплывания облака с ростом Q . Однако с ростом h_0 величина Δt сначала убывает, но при $h_0 \geq 30$ км величина Δt начинает расти при увеличении как h_0 , так и Q .

С ростом величины h_0 происходят несколько процессов. С одной стороны, падает начальная концентрация электронов в облаке из-за экспоненциального уменьшения концентрации молекул в атмосфере с высотой. С другой стороны, уменьшается расстояние до ионосферы и изменяется скорость всплывания облака. В результате общее поглощение в слое возрастает. Кроме того, в интервале высот $h_0 \sim 40$ –60 км (в зависимости от значения Q) происходит качественное изменение размеров облака.

Для малых высот h_0 и $Q \sim 0.4$ –4 ПДж первые ~ 10 с облако имеет форму сфероида с увеличивающимся радиусом (до ~ 0.5 –1 км). Затем горизонтальный размер D неоднородности относительно быстро растет, а вертикальный размер не превышает 2 км ($Q = 0.4$ ПДж) и 10 км ($Q = 4$ ПДж). Из соображений симметрии следует, что на больших высотах в случае сильно разреженной атмосферы возмущение будет иметь форму сферы. Поскольку с увеличением h_0 плотность атмосферы экспоненциально уменьшается, то на определенной высоте $h_0 = h_{кр}$ условия ускоренного увеличения горизонтального размера возмущения перестают выполняться. В рамках используемой модели этот переход происходит практически скачком. При $h_0 > h_{кр}$ облако возмущения имеет вид сфероида с относительно малым радиусом. Для оценки величины $h_{кр}$ можно использовать следующее выражение ($Q > 0.1$ ПДж):

$$h_{кр} \approx -18.5 + 118/(1 + 0.439Q^{1/4}), \quad (6)$$

где Q измеряется в ПДж, высота – в км.

На рис. 3 приведена зависимость средней скорости всплывания облака от величины h_0 для $Q = 8$ ПДж. Вид этой кривой определяется указанными выше процессами и качественно объясняет поведение семейства зависимостей $\Delta t(Q)$ на рис. 2.

На рис. 4 приведены зависимости величин D_m и Δt от начальной высоты h_0 для $Q = 4$ ПДж. На рисунке явно видны резкие изменения этих зависимостей при переходе h_0 через критическую величину. Отметим, что величина затухания A_m быстро растет с увеличением h_0 ; для $Q = 0.4$ ПДж

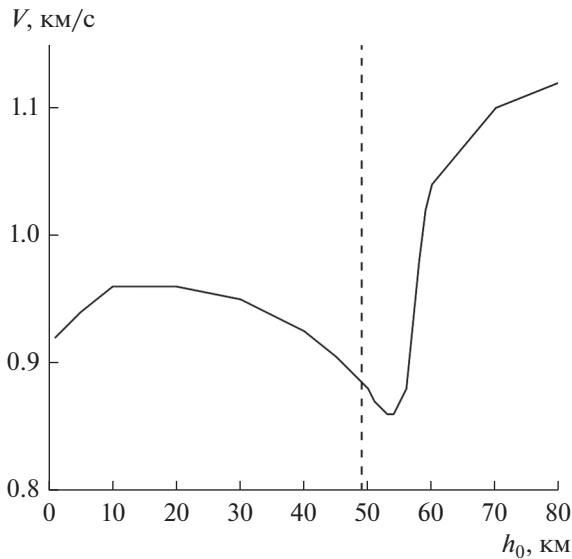


Рис. 3. Зависимость средней скорости V всплывающего возмущенной области от значения начальной высоты возмущения h_0 для $Q = 8$ ПДж; вертикальная штриховая прямая соответствует $h_0 = h_{кр}$.

затухание $|A| > 20$ дБ уже при $h_0 > 10$ км и превышает 100 дБ при $h_0 > 25$ км. Для $Q = 4$ ПДж затухание превышает 100 дБ при $h_0 = 10$ км. Качественно можно считать величину A_m в слое бесконечной при прохождении через него облака, однако время затухания зависит от h_0 более сложным образом. При $h_0 < h_{кр}$ время замираний составляет примерно 2 мин и меняется в относительно узких пределах. При изменении Q в интервале 0.4–4 ПДж высоты $h_{кр}$ лежат в относительно узком интервале значений 69–54 км соответственно. При $h_0 > h_{кр}$ размеры облака резко уменьшаются (см. рис. 3). Это приводит к тому, что время замираний (штриховая кривая) также начинает относительно быстро уменьшаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках метода многократных отражений получены оценки времени замираний радиосигнала на частотах 1–10 кГц в волноводе “Земля–ионосфера” под влиянием сильного локального возмущения атмосферы. Использована разработанная ранее модель точечного возмущения, параметры которой зависят от двух величин: начальной высоты h_0 и начальной энергии Q . Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Величина длительности замираний практически не зависит от гео- и гелиофизических условий, в частности от сезона, времени суток и географического положения. В указанном интервале частот эта величина не зависит от частоты волны.

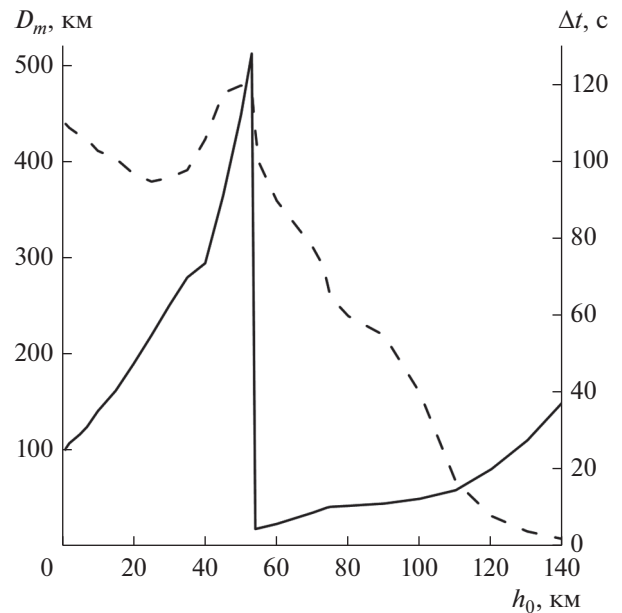


Рис. 4. Зависимость горизонтального размера возмущения D_m (сплошная кривая) и длительности замираний Δt по уровню 3 дБ (штриховая) от значения начальной высоты возмущения h_0 при $Q = 4$ ПДж.

2. Время надежного восстановления связи по всему сечению волновода совпадает с временем восстановления состояния его верхней границы, т.е. в худшем случае составляет ~2 мин после начала замираний сигнала.

3. В нижней ионосфере при максимальных значениях затухания волн горизонтальный размер области возмущения имеет порядок сотен километров, что для частоты 1 кГц составляет по крайней мере несколько длин волн в среде.

4. Для высот $h_0 \approx 50$ –70 км (в зависимости от величины Q) горизонтальный размер возмущения существенно уменьшается, что приводит к уменьшению времени замираний от максимальной величины ~2 мин до десятков секунд при $h_0 > 80$ км.

В заключение отметим, что из литературных источников известны результаты измерения параметров НЧ-сигнала, на трассе распространения которого присутствуют сильные локальные возмущения нижней ионосферы, вызванные высыпаниями энергичных частиц радиационных поясов. Эти высыпания индуцируются электромагнитными импульсами молниевых разрядов. Параметры всплесков затухания НЧ-сигналов в приемнике соответствуют сделанным выше оценкам. Величина начального выброса затухания составляет около 20 дБ, после чего в течение примерно 100–120 с плавно восстанавливается невозмущенное значение [2, 11]. В данном случае физический механизм исчезновения возмущения состоит не в

его механическом перемещении, а в рекомбинации избыточных свободных электронов. Судя по совпадению длительности замираний, оба этих процесса занимают приблизительно одинаковое время.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоглазов М.И., Ременец Г.Ф. Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах. Л.: Наука, 1982.
2. Helliwell R.A., Katsufrakis J.P., Trimpi M. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 22. P. 4679.
3. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981.
4. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. // РЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 317.
5. Макаров Г.И., Новиков В.В. // Успехи физ. наук. 1969. Т. 98. № 4. С. 733.
6. Макаров Г.И., Федорова Л.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 12. С. 1384.
7. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.
8. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. // РЭ. 2020. Т. 65. № 5. С. 434.
9. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004.
10. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 1981.
11. Poulsen L.W. Modeling of Very Low Frequency Wave Propagation and Scattering within the Earth-Ionosphere Waveguide in the Presence of Lower Ionospheric Disturbances // PD Thesis. Space, Telecommunications and Radioscience Lab. Stanford: Stanford Univ. 1991. 158 p. <https://vlfstanford.ku.edu.tr/wp-content/uploads/2010/07/PoulsenThesis.pdf>.