

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.7>

УДК: 537.872.32

ЗАТУХАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПОД ВЛИЯНИЕМ СИЛЬНОГО ЛОКАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

А. В. Мошков

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

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2021 г.

Аннотация. Проведены расчеты величины затухания 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. Параметры модели зависят всего от двух начальных величин: высоты h_0 и энергии Q . Показано, что величина затухания практически не зависит от частоты и гео- и гелиофизических условий. При $h_0 < 50$ км продолжительность замираний не превышает ~ 2 мин. С увеличением h_0 затухание в нижней ионосфере становится чрезвычайно велико. Однако для высот $h_0 \approx 50...70$ км (в зависимости от величины Q) горизонтальный размер возмущения существенно уменьшается, что приводит к уменьшению времени замираний до десятков секунд при $h_0 > 80$ км.

Ключевые слова: нижняя ионосфера, низкие частоты, атмосфера, сильное локальное возмущение, повышенная ионизация, ослабление амплитуды волны.

Abstract. The value and duration of attenuation of low frequency waves (1...10 kHz) in the presence of a strong local disturbance of the atmosphere have been estimated. Sources of significant local disturbances of the atmosphere are, for example,

precipitation of energetic particles of radiation belts; electromagnetic pulses of lightning discharges; radiation of powerful low-frequency ground-based transmitters; invasion of large meteors. Strong local disturbances lead to an increase of ionization (concentration of free electrons) of the environment by several orders of magnitude in the region of space whose characteristic dimensions are comparable to the length of the wave (tens and hundreds of kilometers). As such a disturbance, we use the previously developed macroscopic model of an instantaneous, point release of a relatively large amount of energy in the atmosphere below the ionosphere. This model makes it possible to estimate the features of the propagation of low-frequency waves through the disturbed layer of the lower ionosphere by changing only two initial parameters: the disturbance energy and its initial height. It is shown that the attenuation value is almost independent of frequency and geo- and heliophysical conditions. For initial heights up to 50 km, the fading duration does not exceed ~ 2 min. With an increase of the initial altitude, the attenuation in the lower ionosphere becomes extremely large. However, for heights of 50...70 km (depending on the value of energy), the horizontal size of the disturbance decreases significantly, which leads to a decrease in the fading time to tens of seconds for initial heights of more than 80 km.

Key words: low frequencies, lower ionosphere, atmosphere, strong local disturbance, enhanced ionization, wave attenuation.

Введение.

Низкочастотные (НЧ) системы связи отличаются стабильностью сигнала по частоте и фазе, относительно слабым затуханием на длинных трассах, практическим отсутствием помех искусственного происхождения, слабой чувствительностью к особенностям рельефа и метеоусловиям на трассе. Источниками заметных локальных возмущений атмосферы являются, например, высыпания энергичных частиц радиационных поясов, электромагнитные импульсы молниевых разрядов, вторжение крупных метеорных тел, излучение мощных низкочастотных наземных передатчиков. Например, сферическое небесное тело с плотностью 1 кг/м^3 , радиусом 1 км и скоростью 10 км/с выделяет

при полном торможении энергию ~ 200 ПДж в достаточно малом объеме (1 петаджоуль равен 10^{15} Дж). Такой же энергией обладал, по оценкам, Тунгусский метеорит [1]. Энергия Сихотэ-Алинского метеорита составила ~ 0.1 ПДж.

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 [2]. Эти высыпания индуцируются электромагнитными импульсами молниевых разрядов, имеющих энергетический максимум в интервале частот $5 \dots 10$ кГц. Параметры всплесков затухания НЧ-сигналов в приемнике зависят от энергии разряда и параметров трассы радиосигнала. Типичная величина начального выброса затухания составляет около 20 дБ, после чего в течении примерно $100 \dots 120$ с плавно восстанавливается невозмущенное значение. В приполярных областях во время сильных геомагнитных возмущений обрывы связи на низких частотах могут достигать несколько часов и более [3], однако такие возмущения трудно отнести к локальным.

Определим сильные локальные возмущения как такие, которые приводят к увеличению ионизации (концентрации свободных электронов) окружающей среды на несколько порядков величины в области пространства, характерные размеры которой сравнимы с длиной НЧ волны, то есть, от десятков до нескольких сотен километров. Особенности распространения радиоволн высокой частоты в присутствии таких возмущений были рассмотрены ранее [4].

Цель данной работы состоит в оценке величины и времени ослабления сигнала в присутствии сильного локального возмущения атмосферы. 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 $\sim 0.1 \dots 10$ ПДж [4]. Эта модель позволяет оценить особенности распространения НЧ-волн через

возмущенный слой нижней ионосферы при помощи изменения всего двух начальных параметров – энергии Q и высоты h_0 . В работе рассмотрены сверхдлинные радиоволны в интервале частот $1 \dots 10$ кГц (длины волн $30 \dots 300$ км).

1. Постановка задачи.

Теория распространения НЧ-радиоволн вдоль поверхности земли к настоящему времени построена [5]. Простейшая модель такого распространения наглядна и 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. Эта процедура получила название «метод скачков», или «метод многократно отраженных волн» [6, 7]. При этом поверхность земли является хорошо проводящей средой, а нижнюю ионосферу в области отражения волны можно считать плоскостистой гиротропной холодной плазмой. В случае отсутствия возмущения коэффициенты отражения, прохождения и затухания такой среды можно относительно просто вычислить [8]. Для целей данной работы метод скачков является основой для оценок затухания сигнала, поскольку области отражения парциальных лучей от земли и ионосферы имеют характерный размер порядка длины волны и могут рассматриваться независимо от остальных участков трассы распространения сигнала. Предполагается, что область отражения волн и область возмущения в нижней ионосфере приблизительно совпадают. По этой причине сделанные ниже оценки величины затухания и длительности вызванных им замираний сигнала носят характер оценок сверху.

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 [9]. Выше этого слоя ионосферу можно считать плавно меняющейся средой, а

эффективная частота соударений электронов, ответственная за поглощение, становится пренебрежимо малой. Запишем известное выражение для коэффициента затухания δ в плазме [10] в виде:

$$\delta \approx 4,6 \cdot 10^{-2} N_e \nu_e / (\omega^2 + \nu_e^2), \text{ дБ/км, (1)}$$

где N_e концентрация свободных электронов, см^{-3} ; ν_e – эффективная частота соударений электронов, с^{-1} ; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота волны, с^{-1} . В ионосфере обычно выполняется условие $\omega^2 \gg \nu_e^2$ и справедливо часто используемое приближение

$$\delta \approx 1,3 \cdot 10^{-4} N_e \nu_e \lambda^2, \text{ дБ/км, (2)}$$

где длина волны λ измеряется в метрах.

Плотность атмосферы экспоненциально растет с уменьшением высоты. На высотах менее 50 км становится справедливым неравенство $\omega^2 \ll \nu_e^2$ и, соответственно, соотношение (1) примет вид

$$\delta \approx 4,6 \cdot 10^{-2} N_e / \nu_e, \text{ дБ/км. (3)}$$

Известно, что примерно через 1 с после начала точечного возмущения формируется область повышенной ионизации и высокой температуры («облако»). Эта область относительно быстро начинает всплывать вертикально вверх практически с постоянной скоростью, увеличиваясь в размерах. Ионизация в облаке определяется начальным количеством молекул воздуха в нем, и для высот старта $h_0 < 50$ км ее величина чрезвычайно велика – любой радиосигнал испытает при прямом прохождении через облако «абсолютное» ослабление [4].

Задача ставится следующим образом. Пусть на высоте h_0 над поверхностью земли в условный момент времени $t = 0$ происходит мгновенное точечное выделение энергии Q . По мере всплытия облако ионизации модифицирует параметры плазмы в слое нижней ионосферы. Следует определить величину и зависимость от времени степени ослабления НЧ-волны в слое нижней ионосферы, расположенном на высоте от 50 до 150 км над поверхностью земли. Для моделирования динамики возмущения атмосферы используем модель [4], которая подверглась незначительной модификации:

зависимости плотности и температуры невозмущенной атмосферы от высоты приведены в соответствие с моделью стандартной атмосферы [11]. Затухание сигнала в невозмущенной ионосфере вычислялось для дневной и ночной моделей, соответствующих равноденственному сезону при средней активности Солнца [9]. Ослабление амплитуды волны определяем при помощи численного интегрирования коэффициента затухания (1) по высоте в слое.

2. Результаты расчетов.

С увеличением времени t возмущенная область всплывает в атмосфере приблизительно с постоянной скоростью. С увеличением Q эта скорость возрастает: при $Q = 0.1 \dots 4$ ПДж она лежит в интервале $0.4 \dots 0.9$ км/с. На рис. 1 приведены результаты расчетов величины A затухания волны в слое и высоты центра возмущения в зависимости от времени для дневной ионосферы.

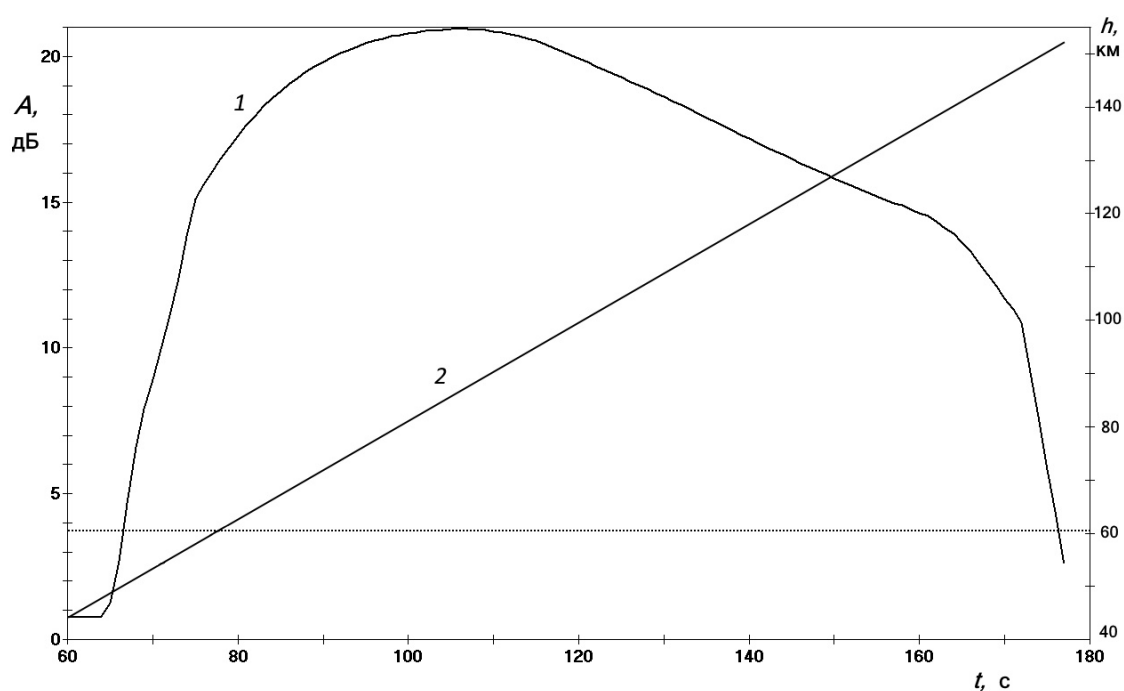


Рис. 1. Зависимость величины затухания A в дневной нижней ионосфере (1) и высоты h центра возмущения (2) от времени для частоты 10 кГц, $Q = 4$ ПДж, $h_0 = 1$ км. Горизонтальная пунктирная прямая соответствует уровню на 3 дБ выше фонового затухания в ионосфере.

На рисунке виден характерный ход кривой $A(t)$: до момента времени ~ 64 с затухание в слое соответствует невозмущенной ионосфере (~ 0.75 дБ).

С приходом облака затухание начинает резко расти до величины ~ 20.9 дБ (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 величине.

Основные параметры облака формируются в той точке, где началось возмущение, и эти параметры практически не зависят от времени суток, сезона и солнечной активности. Поэтому для ночной ионосферы картина затухания будет полностью идентичной рис. 1, отличаясь только величиной начального ослабления ($\sim 0,03$ дБ). Соответственно, затухание в максимуме $A(t)$ составит ~ 20.2 дБ. Временные параметры кривой неизменны. По этой причине везде далее будем использовать только дневную модель ионосферы для уменьшения количества данных.

Вычислим также длительность Δt затухания волны под влиянием возмущения. Для этого выберем условный уровень 3 дБ над невозмущенным значением (см. рис. 1). Получим $\Delta t \approx 110$ с.

Говорить о затухании НЧ волны имеет смысл только в том случае, если размер области возмущения сравним или превышает длину волны. В интервале частот $1 \dots 10$ кГц длина волны в пустом пространстве меняется от 300 до 30 км. Для данных на рис. 1 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 $\sim f^{-1/2}$ [10, 12]. Для качественных оценок можно считать, что в интервале частот $1 \dots 10$ кГц «средний» показатель преломления в невозмущенной ионосфере составит $\sim 5 \dots 10$. 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 ($\sim 8 \cdot 10^9$ см $^{-3}$) и ν_e ($\sim 9 \cdot 10^7$ с $^{-1}$) велики относительно невозмущенных ионосферных величин на этой высоте ($\sim 6 \cdot 10^3$ см $^{-3}$

и $\sim 7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$). 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 распространении НЧ радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера» в присутствии локального возмущения. Это не входит в цели данной работы. Поэтому в первом приближении будем считать, что частотная зависимость отсутствует, и все дальнейшие результаты будут приведены для частоты 10 кГц.

На рис. 2 приведены зависимости $A(t)$ и $D(t)$ от Q . Из рисунка видно, что зависимости этих величин от Q слабее, чем прямая пропорциональность. Физически это объясняется тем, что при фиксированном значении h_0 величина начальной ионизации ограничена уровнем концентрации молекул воздуха до возникновения облака.

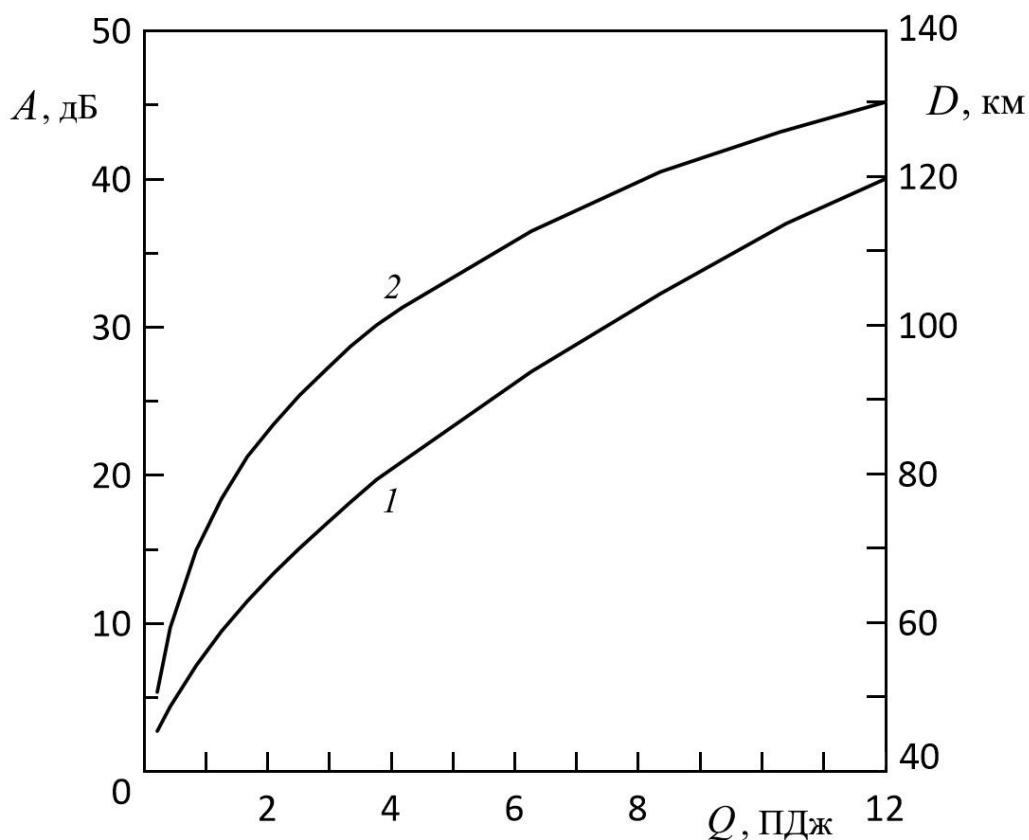


Рис. 2. Зависимость максимальной величины затухания A в нижней ионосфере (1) и соответствующего горизонтального размера D возмущения (2) от начальной энергии Q для $h_0 = 1$ км.

С корреляцией не хуже 0.998 получим следующие аппроксимации данных на рис. 2:

$$A(Q) = -5.206 + 13.14 \cdot Q^{1/2};$$

$$D(Q) = 4.173 + 68.62 \cdot Q^{1/4}.$$

На рис. 3 приведены зависимости величин D и Δt от начальной высоты h_0 для двух значений Q .

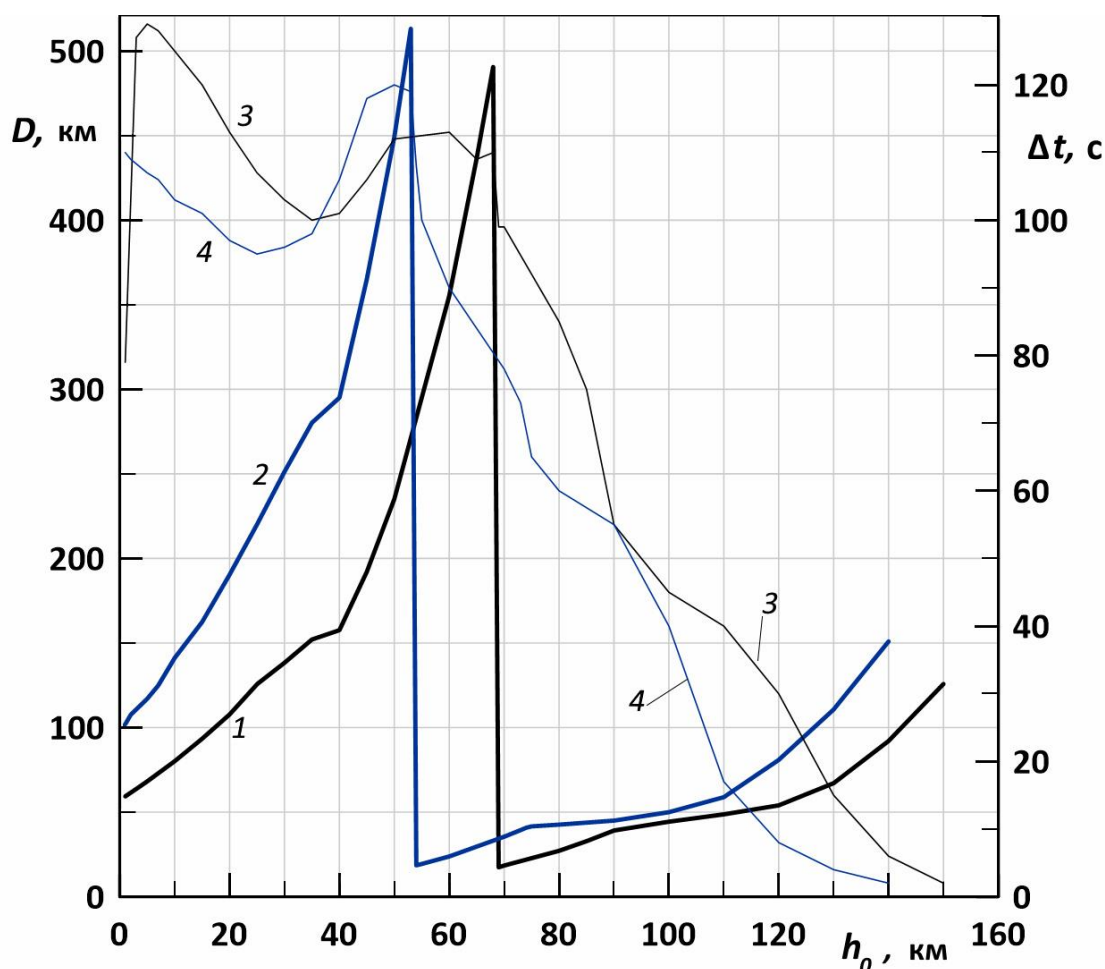


Рис. 3. Зависимость горизонтального размера D возмущения (1, 2) в момент максимального значения затухания A в нижней ионосфере, и длительности Δt периода затухания волны (3, 4) от значения начальной высоты возмущения h_0 .
Кривые 1, 3 – $Q = 0.4$ ПДж; 2, 4 – 4 ПДж.

Зависимость параметров задачи от значения h_0 является относительно сильной. Величина затухания A быстро растет с увеличением h_0 : для $Q = 0.4$ ПДж 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. С ростом величины h_0 начинают конкурировать несколько процессов. С одной стороны, падает

начальная концентрация электронов в облаке из-за уменьшения концентрации молекул в атмосфере с высотой. С другой стороны, уменьшается расстояние до ионосферы и возрастает скорость всплытия облака. В результате общее поглощение в слое возрастает.

Качественно можно считать затухание в слое бесконечным, но время затухания зависит от h_0 более сложным образом. Это связано с изменением скорости роста горизонтального размера области возмущения с увеличением начальной высоты в атмосфере. Для пояснения этого эффекта на рис. 3 приведены зависимости $D(h_0)$. Для начальных высот менее 30 км и энергий 0.4...4 ПДж имеет место следующий сценарий. Первые ~ 10 с облако возмущения имеет форму сфероида с увеличивающимся радиусом (до $\sim 0,5...1$ км). Затем горизонтальный размер области возмущения D быстро растет, а вертикальный размер не превышает 2 км ($Q = 0.4$ ПДж) и 10 км ($Q = 4$ ПДж). С другой стороны, из условий симметрии следует, что в сильно разреженной атмосфере облако возмущения будет представлять собой сферу. Поскольку с увеличением h_0 плотность атмосферы экспоненциально уменьшается, то на определенной высоте $h_0 = h_{кр}$ условия преимущественного роста горизонтального размера области возмущения перестают выполняться.

На рис. 3 видно, что этот переход происходит практически скачком. При изменении Q в интервале 0.4...4 ПДж, высоты $h_{кр}$ лежат в относительно узком интервале значений 69...54 км соответственно. При $h_0 > h_{кр}$ облако возмущения имеет вид сфероида с относительно малым радиусом (см. рис. 3). Это приводит к тому, что время существования значительного затухания в слое начинает быстро уменьшаться (кривые 3, 4).

Заключение.

В работе представлены результаты расчетов величины уменьшения амплитуды электромагнитных волн с частотами 1...10 кГц при прохождении плоского неоднородного слоя нижней ионосферы в присутствии сильного локального возмущения атмосферы. Использована разработанная ранее модель

точечного возмущения атмосферы, параметры которой зависят от двух начальных величин: высоты h_0 и энергии Q . Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Величина затухания практически не зависит от гео- и гелиофизических условий, в частности, от сезона, времени суток и географического положения.

2) В указанном интервале частот величина затухания практически не зависит от частоты волны.

3) Зависимость величины затухания A и горизонтального размера возмущения D от значения Q не является определяющей. С хорошей точностью можно считать, что $A \sim Q^{1/2}$ и $D \sim Q^{1/4}$. В нижней ионосфере при максимальных значениях A горизонтальный размер области возмущения имеет порядок сотен километров, что для частоты 1 кГц составляет десять и более длин волн в среде.

4) С увеличением h_0 затухание в нижней ионосфере становится чрезвычайно велико. Однако для высот $h_0 \approx 50...70$ км (в зависимости от величины Q) горизонтальный размер возмущения существенно уменьшается, что приводит к уменьшению времени существования повышенного затухания от величины ~ 2 мин до десятков секунд при $h_0 > 80$ км.

Литература

1. Бронштэн В.А. *Физика метеорных явлений*. Москва, Наука. 1981. 416 с.
2. Helliwell R.A., Katsufakis J.P., Trimpi M. Whistler-induced amplitude perturbation in VLF propagation. *Journal of Geophysical Research*. 1973. V.78. №22. P.4679-4688. <https://doi.org/10.1029/JA078I022P04679>
3. Белоглазов М.И., Ременец Г.Ф. *Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах*. Ленинград, Наука. 1982. 237 с.
4. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Распространение высокочастотных радиоволн при условии сильного локального возмущения ионосферы. *Радиотехника и Электр.* 2013. Т.58. №4. С.317-323. <https://doi.org/10.7868/S0033849413040128>
5. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. *Распространение радиоволн в волновом канале Земля-ионосфера и в ионосфере*. Москва, Наука. 1994. 152 с.

6. Макаров Г.И., Новиков В.В. Вопросы распространения сверхдлинных радиоволн в полноводном канале Земля-ионосфера. *Успехи физических наук*. 1969. Т.98. №4. С.733-735.
<https://doi.org/10.1070%2FPU1970v012n04ABEH004065>
7. Макаров Г.И., Федорова Л.А. Метод многократно отраженных волн в задаче о распространении электромагнитных волн в регулярных волноводах. *Известия вузов. Радиофизика*. 1982. Т.25. №12. С.1384-1409.
8. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Численное моделирование прохождения волн очень низкой частоты через магнитоактивную плоскоструктурную плазму нижней ионосферы Земли. *Радиотехника и Электроника*. 2020. Т.65. №5. С.434-441. <https://doi.org/10.31857/S0033849420050101>
9. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н. *Эмпирические модели среднеширотной ионосферы*. Москва, Наука. 1981. 256 с.
10. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. Москва, Мир. 1973. 502 с.
11. ГОСТ 4401-81. *Атмосфера стандартная. Параметры*. Москва, ИПК Издательство стандартов. 2004. 165 с.
12. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Численное моделирование распределения низкочастотного поля, создаваемого передающей рамочной антенной, установленной на борту космического аппарата. *Радиотехника и Электроника*. 2019. Т.64. №9. С.866-873.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419080126>

Для цитирования:

Мошков А.В. Затухание низкочастотных электромагнитных волн в нижней ионосфере земли под влиянием сильного локального возмущения в атмосфере. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.7>