

УДК 534.222 : 537.874

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ РАДИОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рыжов Николай Александрович¹, кандидат физико-математических наук
e-mail: rynical@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе рассматривается методика измерения температуры мезосферы, и нижней ионосферы при помощи радиоакустическом зондировании ионосферной плазмы. Данное рассмотрение позволяет осуществить дистанционные измерения в областях высот D или E слоя ионосферы, где иные методы исследования практически не реализуемы.

Ключевые слова: мезосфера, ионосфера, дистанционные методы измерения, радиоакустическое зондирование.

MEASUREMENT OF THE LOWER IONOSPHERE TEMPERATURE BY THE RADIOACOUSTIC METHOD

Nickolay A. Ryzhov¹, Candidate of Physico-Mathematical Sciences
e-mail: rynical@gmail.com

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper discusses a method for measuring mesosphere and lower ionosphere temperature based on radioacoustic sounding of ionospheric plasma. This consideration allows remote measurements at the height of the ionosphere D- or E- layers, where other measurements are doubtful.

Keywords: mesosphere, ionosphere, remote measurements, radio-acoustic sounding.

Диагностика состояния ионосферы и измерения ее параметров имеют важное значение, в том числе для анализа характера отражения радиоволн и состояния радиосвязи, особенно в высоких широтах. Даная проблематика обусловлена взаимным влиянием различных слоев ионосферы. Важными измеряемыми параметрами при этом являются температура нейтральной компоненты и электронная концентрация. При этом измерения параметров мезосферы в области высот 60-100 км вызывают большие сложности. Так, возможные способы наблюдения сводятся к локальным и дистанционным. Локальные методы на высотах мезосферы и нижней ионосферы крайне затруднены, поскольку для наблюдений со спутников это слишком низкие высоты, а для летательных аппаратов – слишком высокие. Дистанционные же методы сводятся к методам, основанным на рассеянии

(отражении) радиоволн. Однако, в отличие от высот развитой ионосферы (верхний Е- и F-слой) отражение радиоволн от области мезосферы весьма слабо (особенно в ночное время), что обусловлено низкой концентрацией электронной компоненты. Для исследования состояния нижней ионосферы и мезосферы на указанных высотах, необходимо найти иной дистанционный метод. Подобные возможности предоставляет радиоакустическое зондирование, обсуждение которого применительно к исследованию нижней ионосферы.

Метод радиоакустического зондирования [1, 2] определяется брегговским рассеянием радиоволны на вариациях плотности среды создаваемой обусловленными распространением акустической волны. Отражение радиоволны происходит при выполнении условий пространственного синхронизма между звуковой и радиоволнами (падающей и отраженной), в соответствии условием $\vec{k}_i - \vec{k}_r = \vec{k}_a$, где $\vec{k}_i, \vec{k}_r, \vec{k}_a$ – волновые векторы падающей, отраженной и акустической волн. В соответствии с данным условием, что сдвиг между частотой принимаемого радиосигнала f и излученного f_0 должен равняться звуковой частоте F , или, иными словами, длина волны акустического излучения должна составлять половину длины радиоволны в направлении распространения: $\lambda_a = \lambda/2$. В случае обратного рассеяния, условие для соотношения частот радиоволны и акустической волны будет выглядеть как: $\frac{c}{f} = \frac{2c_a}{F}$, где c и c_a – скорости электромагнитной и акустических волн. Скорость звука однозначно связана с температуры среды (для тропосферы можно считать, что $c_a = 20,05\sqrt{T}$), вследствие чего брегговское рассеяние будет иметь место лишь при определенной частоте звука. Таким образом, регистрируя сдвиг частоты рассеянного сигнала относительно излученного мы регистрируем температуру среды в точке рассеяния.

Для тропосферы этот метод активно применяется, и кроме дистанционного измерения температуры среды позволяет при применении фазовых методов анализировать короткопериодные вариации продольной компоненты скорости ветра [3].

Потенциал радиоакустического зондирования в случае больших высот ограничен такими условиями как амплитуда акустической волны в области рассеяния и соответственно – мощность акустического излучателя, и мощность радиоисточника. Амплитуда звуковой волны при распространении уменьшается в связи с ослаблением счет турбулентности и вязкости атмосферы, и за счет уменьшения плотности среды при увеличении высоты [4, 5]. Последнее особенно значимо при распространении на больших высотах. Так, волны на частотах ниже 25 Гц могут распространяются почти без затухания до высоты около 80 км, т.е. до нижней ионосферы [6-12]. При этом чем ниже частота звуковой волны, тем больше эффективная высота, до которой она распространяется. На рис. 1 приведены сравнительные графики изменения амплитуды акустической волны с высотой для акустических волн на частотах 20, 5 и 1 Гц. Средний квадрат числа Маха (M) для звуковой волны рассчитан на основании уравнения переноса [13].

$$\langle M^2 \rangle = \frac{P_a}{2\pi z^2 \rho c_s^2} \exp\left(-\int_0^z \Gamma dz\right), \quad (1)$$

где P_a – мощность акустического источника, ρ – плотность атмосферы на высоте z , c_s – скорость звука. Коэффициент поглощения звука $\Gamma = \frac{16\pi^2 f^2 \eta}{3\rho c_s^3}$, где f – частота волны, $\eta = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Н/мс}$ – динамическая вязкость воздуха. Максимальная высота $z_{\max}$, выше которой звук резко затухает, определяется условием $\int_0^{z_{\max}} \Gamma dz \geq 1$ и зависит от частоты

волны. Так, для звука частотой 20 Гц можно полагать, эффективную высоту до которой он распространяется в 80 км, а для частоты 1 Гц высота распространения составит уже 120 км.

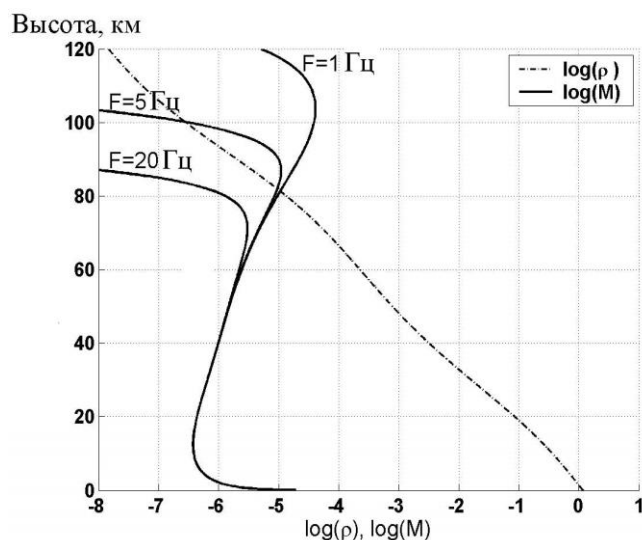


Рисунок 1 – Изменение амплитуды акустической волны от высоты выраженной в числах Маха и плотности атмосферы

Вышеуказанные соображения позволяют реализовать метод радиоакустическое зондирование для мезосферы [4, 5]. Обусловлено это тем, что хоть ждя мезосферы вариации плотности среды в звуковой волне будут невелики, однако вместе с вариацией плотности нейтральной компоненты в ионосфере будет формироваться квазипериодической решеткой плазмы и рассеяние радиоволн будет определяться этой решеткой [14, 11]. Фактически образуется волна плотности плазмы, совпадающая со звуковой волной, а относительная амплитуда вариации электронной плотности будет равна числу Маха в звуковой волне. Коэффициент отражения радиоволн от неоднородностей электронной концентрации на много порядков больше, чем при рассеянии на неоднородностях плотности нейтральной компоненты атмосферы и интенсивность рассеянного сигнала в этом случае, будет достаточной для регистрации отраженного сигнала приемником на поверхности Земли [12]. Следовательно, метод радиоакустического зондирования в применении к ионосфере полностью сохраняет диагностические способности метода, и с его помощью можно получать профили температуры среды для высот мезосферы и нижней ионосферы, что позволит дистанционно измерять температурные профили и регистрировать вертикальные движения в мезосфере на высотах 80 - 100 км по методикам, разработанным для исследования тропосферы. В дополнении к этому радиоакустическое зондирование мезосферы позволяет измерять профили электронной концентрации путем регистрации интенсивности сигнала, рассеянного на различных высотах. Одновременно с этим по характеру спада сигнала выше 80 км можно определять плотность нейтрального газа. Возможность применения указанного метода для мезосферных высот зависит от интенсивности сигнала, который можно получить при рассеянии на акустических неоднородностях в плазме. С одной стороны, большая высота приводит как выше отмечено к ослаблению акустической волны при ее прохождении до больших высот, а также ослаблением радиоволны за счет увеличения площади слабонаправленной антенны, но с другой стороны рассеяние в ионосфере происходит не на вариациях плотности воздуха, а на решетке образованной вариациями электронной концентрации в плазменной компоненте, что гораздо эффективнее.

В классическом случае радиоакустического зондирования тропосферы рассеяние электромагнитной волны происходит на порожденных звуковой волной периодических неоднородностях плотности воздуха [2]. Коэффициент отражения электромагнитной волны от такой решетки мал, однако интенсивность сигнала увеличивается за счет фокусировки отраженной радиоволны от сферической волны звука. Мощность рассеянного сигнала на входе приемника радара будет определяться [3] как:

$$P_{sc} = \frac{P_a P_t \alpha k^2 L_a^2 N^2 \eta_a \eta_t}{8z^2} F(L_a, L_t, L_r) \quad (2)$$

где P_a и P_t – мощности акустического излучателя и радиоизлучателя соответственно, k – волновое число электромагнитной волны, L_a – размер акустического излучателя, N – число периодов акустического сигнала в импульсе, η_a, η_t – коэффициенты ослабления акустического и радиосигнала, z – высота с которой происходит рассеяние, $\alpha = 4.7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{Вт}$ – поперечник рассеяния радиоволн на звуковой волне в воздухе.

Безразмерный фактор $F = \frac{4L_t^2 L_r^2}{(4L_a^2 + L_t^2 + L_r^2)^2}$ определяется размерами антенн L_a, L_t, L_r

(акустического излучателя, радиопередатчика приемника). Эффективность работы радиоакустической системы в большом диапазоне высот ограничены такими факторами как мощностью и размеры излучателей (акустического и радио) и ветровым сносом "акустического зеркала" который приведет к смещению пятна принятого радиосигнала на поверхности Земли за пределы апертуры приемной антенны. Системы РАЗ, для дециметровых волн, слабо чувствительны к ветровому сносу пятна, поскольку размеры антенн локатора обычно больше 100 м, так что ветровым сносом можно пренебречь. На распространение акустических волн в атмосфере влияет множество факторов, так что при большой высоте распространения точную форму волнового фронта предсказать трудно, и для оценок будем считать фронт акустической волны плоским.

Для оценки величины рассеянного на акустической решетке сигнала используем в приближении малых возмущений следующим выражением [2]:

$$\vec{E}_{sc}(\vec{r}, t) = \int \delta\epsilon(\vec{r}', t - \frac{r'}{c}) \vec{E}_0(\vec{r}', t - \frac{r'}{c}) \frac{d^3\vec{r}'}{r} \quad (3)$$

Здесь $\delta\epsilon$ – возмущение диэлектрической проницаемости, $\vec{E}_0$ – напряженность поля падающей волны, $\vec{E}_{sc}$ – поле рассеянной волны. Предполагая рассеяние на плоской акустической решетке в зоне Френеля, получим для коэффициента отражения R от решетки в плазме в брэгговском приближении выражение:

$$R = kLM \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где L – размер области синхронизма, k – волновое число радиоволны. Мощность сигнала на входе приемника для приведенных может быть вычислена как:

$$P_{sc} = \frac{P_t G S R^2}{4\pi(2z)^2}, \quad (5)$$

где P_t – мощность передатчика, G – коэффициент направленного действия передающей антенны, S – площадь приемной антенны.

В соответствии с приведенными уравнениями можно оценить интенсивность сигнала при радиоакустическом зондировании мезосферы. Будем полагать мощность радара 1 кВт на частоте ~ 9 МГц, параметры антенн радара $G = 300$, $S = 100 \text{ м}^2$ и акустический излучатель имеющим мощностью излучения 1000 Вт на частоте 20 Гц. Электронную

концентрация возьмем равной $n_e = 10^3 \text{ см}^{-3}$, что соответствует плазменной частоте около 0.3 МГц, а размер синхронизма $L = 300 \text{ м}$. Для указанных значений величина полезного сигнала на входе приемника составит $P_{sc} = 5 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$, при мощности шума в полосе 1 Гц (температура космического фона $T = 10^5 \text{ К}$) равной $P_N = 1.2 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$. Видно, что ожидаемый рассеянный сигнал превышает шум в 4 раза, что позволяет утверждать о применимости данной методики для исследований мезосферы.

Рассмотренная выше методика исследований мезосферы была предварительно опробована в 2004 году на базе ионосферного нагревного стенда «Сура» [14]. В данном эксперименте радар работал на несущей частоте 9,02 МГц а в качестве акустического излучателя использовалась мощная сирена с согласующим экспоненциальным рупором. Мощность акустического излучения составляла 1000 Вт, а частота могла перестраиваться в пределах 15–23 Гц по заданной программе, так, чтобы могло выполняться условие синхронизма в диапазоне всех возможных значений температуры, для мезосферных высот. В экспериментах излучатель работал в непрерывном режиме с линейной частотной модуляцией. Время прохождения акустического пакета от поверхности земли до мезосферы составляет около 5 мин, так что акустический излучатель и радар работали поочередно по 5 минут в 10-минутном цикле.

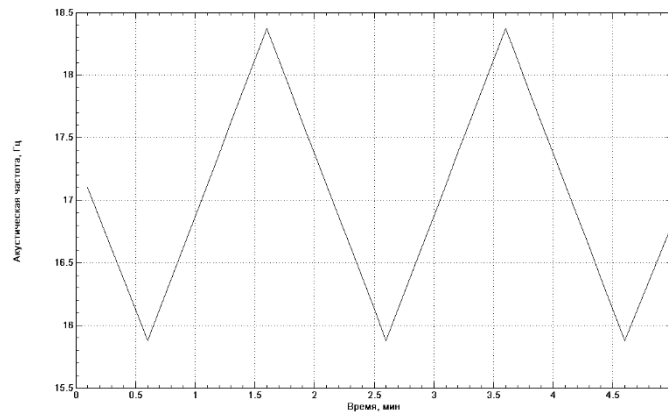


Рисунок 2 – зависимость акустической частоты от времени

Для излучения и приема радиосигнала использовались две секции антенны стенда «Сура», размеры каждой секции составляют 100 х 300 м. В качестве передатчика использовался радиопередатчик ПКВ-250. Длительность импульса передатчика составляла 300 мкс, период повторения импульсов – 2500 мкс. В качестве приемника применялось радиоприемное устройство Р-155 («Брусника»). Приемник был отстроен относительно частоты передатчика на величину -200 Гц, принятый сигнал брался с выхода ПЧ-2, обработка принятого сигнала проводилась аналогично синхронному детектированию с фильтрацией низкочастотной составляющей и дальнейшей спектральной обработке.

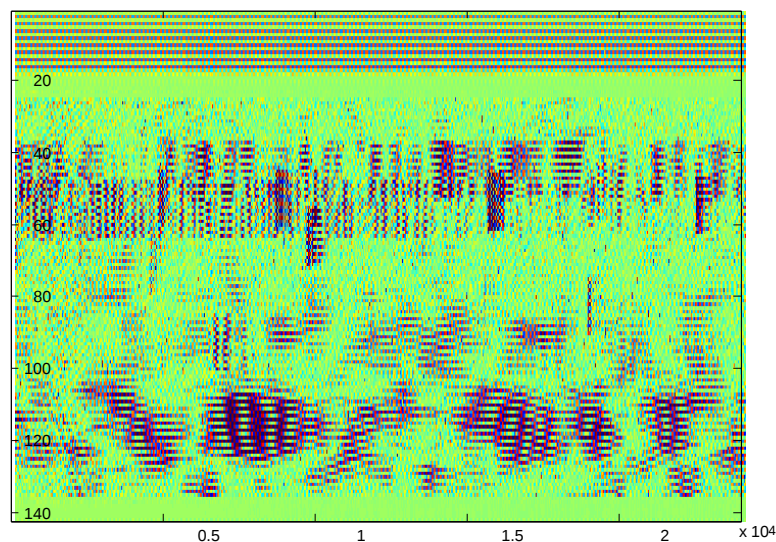


Рисунок 3 – Пример принятого сигнала (яркостная запись). Высота (вертикальная ось) отложена в отсчетах (100 соответствует высоте 264 км). Время отложено в тактовых периодах повторения импульса передатчика (2500 мкс)

Высота рассеяния, определяется, на основании времени распространения акустического импульса и задержки при отражении, с учетом циклической работы. Спектрограмма для сигнала, соответствующего рассеянию с высоты 75-80 км приведена на рис. 4.

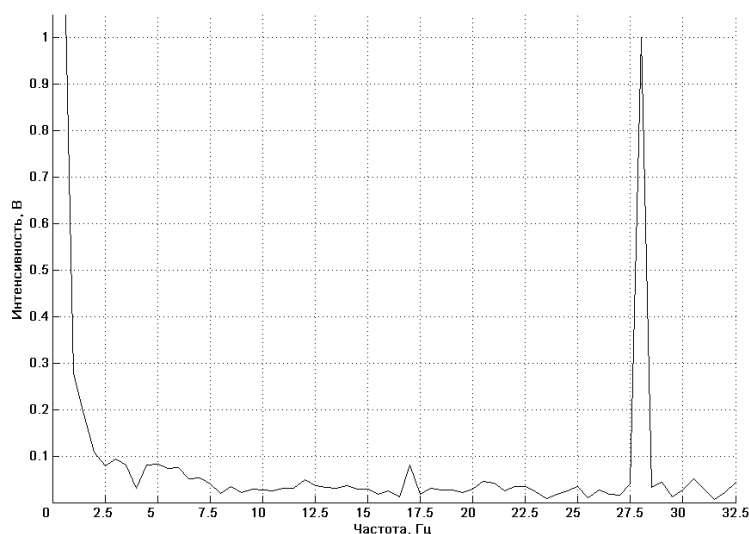


Рисунок 4 – Спектрограмма сигнала, соответствующая рассеянию с высоты 75-80 км

Частоты до 7 Гц определяются рассеянием на естественных неоднородностях, а спектральная линия на частоте 28 Гц – контрольный сигнал, амплитудой 1 мкВ. Хорошо заметна линия на частоте 17 Гц, которая по соответствует рассеянию на звуковой решетке. Видно, что ее величина, исходя из сравнения с контрольным сигналом составляет 0.1 мкВ. Между тем сигнал отчетливый и позволяет определить температуру в указанной области исходя из условий синхронизма. Поскольку акустическая частота меняется циклически, проходя все возможные значения, обеспечивающие условия синхронизма, мы проходим все значения температур и для заданной высоты, и получаем отклик при выполнении условий

синхронизма. Исходя из заданных частоты радиопередатчика ($f=9.02$ МГц) и сдвига принятого сигнала (т.е. звуковой частоты) $F=17\pm 0,25$ Гц получаем значение температуры для данной высоты $T=199 \pm 6$ К.

Рассмотренные в работе подходы, и результаты экспериментов подтверждают применимость метода радиоакустического зондирования для мезосферы и нижней ионосферы для определения параметров среды на высотах 80-100 км. В проведенном эксперименте исследование параметров ионосферы проводилось в одной локальной точке, что представляет научный интерес, но ограниченную практическую ценность, хотя знание же состояния нижней ионосферы важно для анализа состояния радиосвязи, что особенно важно в высоких широтах. Вместе с тем, установку, реализующую данный метод, можно сделать перемещаемой, например на борту нескольких судов, что придаст ей мобильность. В таком исполнении с ее помощью можно анализировать состояние нижней ионосферы в ряде точек вдоль заданной морской или речной трассы, что особенно важно для северного морского пути.

Список литературы:

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – Москва:Наука, 1985.
2. Гурвич А.С., Кон А.И., Татарский В.И. Рассеяние электромагнитных волн на звуке в связи с задачами зондирования атмосферы. // Изв. вузов. Радиофизика.– 1987. – Т.30.– №4.– С.451-473.
3. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И., Сазонов Ю.А. Исследование малых вариаций параметров тропосферы методом радиоакустического зондирования. // Изв.вузов. Радиофизика.– 1997.– Т.40.– №11.– С.1355–1364.
4. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И., Сазонов Ю.А. Исследование малых вариаций параметров тропосферы методом радиоакустического зондирования. // Изв.вузов. Радиофизика.– 1997.– Т.40.– №11.– С.1355–1364.
5. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И. Роль температурных градиентов и ветров в атмосфере при оценках энергетического потенциала систем радиоакустического зондирования. // Изв.вузов. Радиофизика.– 1997.– Т.40.– №5.– С.616–625.
6. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – Москва: Мир, 1978.
7. Bessalov P.A., Mizonova V.G., Savina O.N. Magnetospheric VLF response to the atmospheric infrasonic waves. // Advances in Space Research.– 2003.– V.31.– №5.– P.1235-1240.
8. Романова Н.Н. О вертикальном распространении коротких акустических волн в реальной атмосфере. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1970.– Т.6.– №2.– С.134-145.
9. Романова Н.Н. О нелинейном распространении акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1971.– Т.7.– № 12.– С.1251-1262.
10. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary. // Annales Geophysicae.– 1985.– V.3.– P.673-679.
11. Плоткин В.В., Израйлева Н.И. О радиоакустическом зондировании ионосферы. // Изв. Вузов. Радиофизика.– 1988.– Т.31.– № 5.– С.537-543.
12. Rapoport V.O., Bessalov P.A., Mityakov N.A., Parrot M., Ryzhov N.A. The possibility of active experiments with artificial monochromatic infrasound waves on ionospheric altitude. // EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003, Geophysical Research Abstracts.– 2003.– V.5. 03105.



13. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – Москва: Наука, 1988. – 736 с..
14. Rapoport V.O., Bepalov P.A., Mityakov N.A., Parrot M., Ryzhov N.A. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment. // J. Atm. Solar-Terr. Phys.– 2004.– V.66.– No.12.– P.1011-1017.
15. Lataitis R.J. Signal power radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence, and vertical temperature gradients. // Radio Sci.– 1992.– V.27.– N.3.– P.369-385.

