

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

КОЭФФИЦИЕНТ АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДВУХЧАСТОТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, Д.Б. ЕВСЕЕВ

Рассматриваются результаты двухчастотных радиолокационных измерений коэффициента амбиполярной диффузии и высоты отражающей точки метеорного следа. Анализируются причины расхождения результатов измерений коэффициента диффузии, проведенных на двух частотах. Отмечается, что доминирующим фактором, влияющим на точность измерения коэффициента диффузии, являются резонансные явления в метеорной плазме.

The results of double-frequency radar measurements of ambipolar diffusion factor and altitude of a meteor trail reflecting point are considered. The paper analyzes the causes of discordance of the results of diffusion factor measurements obtained using two frequencies. It is noted that resonance conditions in meteor plasma are the dominating factor influencing the accuracy of diffusion factor measurement.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение коэффициента амбиполярной диффузии по радионаблюдениям метеорных следов представляет большой интерес для изучения физических процессов в верхней атмосфере. Оценки коэффициента амбиполярной диффузии D используются для вычисления плотности, давления и температуры на высотах метеорной зоны атмосферы. Однако из-за ошибок измерения индивидуальных значений величины коэффициента амбиполярной диффузии оценки зависимостей $D(h)$ и $D(t)$ получают в результате статистической обработки результатов наблюдений, проведенных в течение нескольких суток. Ошибки измерений в основном обусловлены действием различных физических процессов на формирование радиоэха от метеорного следа. В связи с этим изучение структурных параметров верхней атмосферы методом измерения коэффициента амбиполярной диффузии в ранее выполненных работах [1, 2] оказалось малоэффективным. При обработке экспериментальных радиолокационных результатов наблюдения метеоров получаются противоречивые данные об атмосфере, не согласующиеся с ракетными данными. Так высота однородной атмосферы на высоте 90–100 км по результатам многих исследователей равнялась 8–9 км, что сильно отличается от результатов ракетных измерений и приводит к значениям температуры атмосферы, завышенным на 100–150° [2, 3]. Это объяснялось неточностью метода измерения и влиянием наблюдательной селекции [4]. В большинстве ранее проведенных экспериментов высота отражающей точки метеорного следа определялась либо косвенным, либо инструментальным методом со значительной погрешностью, что не позволило выявить особенности поведения структур-

ных параметров атмосферы. Кроме этого, не была достаточно подробно разработана теория рассеяния радиоволн метеорными следами. С появлением теоретических работ [5, 6], посвященных теоретическому анализу поляризационных эффектов при взаимодействии радиоволн с метеорными следами, стало возможно найти аргументированную интерпретацию наблюдаемых физических явлений.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА, МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для измерения индивидуальных характеристик радиометеоров используются радиоэхо от следов неустойчивого типа, для интерпретации которых может быть применена упрощенная теория рассеяния радиоволн. Для ненасыщенных следов огибающая радиоэха аналитически описывается экспонентой, и именно это позволяет определять по амплитудно-временной характеристике (АВХ) коэффициент диффузии.

Двухчастотное зондирование метеорных следов, с одновременным высокоточным определением высоты отражающей точки метеорного следа, дает возможность более детально провести анализ наблюдательного материала, выявить причины существенного отличия средних значений и характера зависимости коэффициента амбиполярной диффузии от высоты.

Измерения проводились с использованием высокоточного фазового автоматического угломера [7–9]. Для каждого метеорного следа были измерены угловые координаты и высота отражающей точки, начальный радиус, коэффициенты амбиполярной диффузии на обеих частотах и скорость метеорного тела. Среднеквадратическая погрешность определения высоты

отражающей точки метеорного следа < 1 км. Основные характеристики аппаратуры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры аппаратуры	РЛС-1	РЛС-2
Рабочая длина волны, м	9,6	5,23
Импульсная мощность передатчика, кВт	80	500
Предельная чувствительность приемника, мкВ	0,7	0,5

Для анализа использовались ненасыщенные метеорные следы, отобранные на большей длине волны. Поскольку по внешнему виду АВХ метеорного радиозеха ненасыщенные метеорные следы достаточно трудно выделить, то применялись количественные критерии оценки принадлежности метеорного следа к группе ненасыщенных метеорных следов [10]. Количественным критерием отбора ненасыщенных метеорных следов с линейной электронной плотностью $\alpha < 2,5 \cdot 10^{11}$ эл $\cdot$ см $^{-1}$ является равенство коэффициентов формы Δ , определенного несколькими независимыми способами:

- методом вписывания экспоненты методом наименьших квадратов (НК) по минимумам АВХ;
- методом вписывания экспоненты методом НК по максимумам АВХ;
- методом вписывания экспоненты методом НК между максимумами и минимумами АВХ;
- по времени уменьшения амплитуды радиозеха в e раз;
- путем сравнения экспериментальной АВХ с набором теоретических АВХ.

Отличия между оценками параметра Δ не превышают 15 %. Отбор с более жесткими требованиями не приводит к более надёжному разделению следов, а только уменьшает статистическую обеспеченность отобранного массива ненасыщенных метеорных следов.

Из предварительно подготовленного массива размером 3250 пар метеорных радиозех, полученных в измерениях 1981–1982 гг., было отобрано 1414, удовлетворяющих вышеизложенным требованиям отбора.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 представлены поля корреляций $\ln D_5$ на h и $\ln D_9$ на h . Здесь индекс при D обозначает округленное значение длины волны РЛС в метрах, на которой проводилось оценивание коэффициента амбиполярной диффузии.

Высотная зависимость $\ln D_9(h)$ и $\ln D_5(h)$, представленная на рис. 1, 2, носит стохастический характер в силу того, что на параметры отраженного сигнала оказывают влияние многие, подчас не поддающиеся учету, факторы. В ряде работ для оценки зависимости между $\ln D_a$ и h использовались выражения для линий регрессии, полученные при корреляционно-регресси-

онном анализе экспериментальных данных. Корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных результатов проводился в предположении, что в интервале высот 80–105 км, $\ln D$ и h связаны линейной корреляционной связью, а это далеко не очевидно. Как показывает анализ экспериментальных данных, высотные профили коэффициента амбиполярной диффузии подвержены модуляции динамическими атмосферными процессами; имеется суточный и сезонный ход.

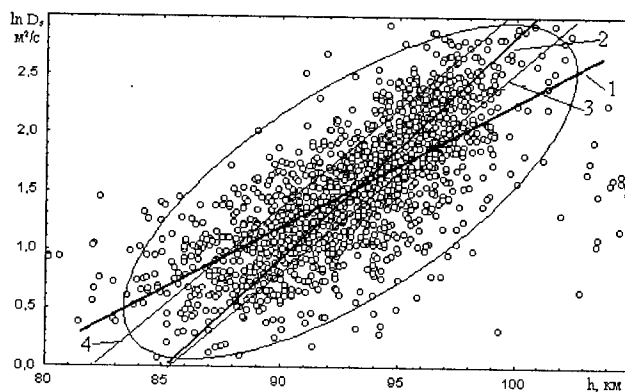


Рис. 1. Поле корреляции $\ln D_5$ на h :

- 1 — линия эмпирической регрессии $\ln D_5$ на h ;
- 2 — линия эмпирической регрессии h на $\ln D_5$;
- 3 — теоретическая зависимость $\ln D(h)$ по [11];
- 4 — теоретическая зависимость $\ln D(h)$ по [2]

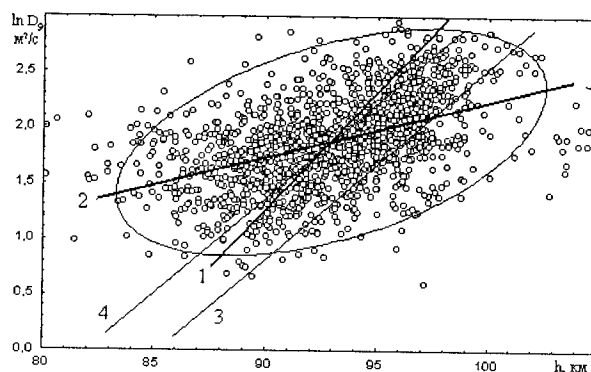


Рис. 2. Поле корреляции $\ln D_9$ на h :

- 1 — линия эмпирической регрессии $\ln D_9$ на h ;
- 2 — линия эмпирической регрессии h на $\ln D_9$;
- 3 — теоретическая зависимость $\ln D(h)$ по [11];
- 4 — теоретическая зависимость $\ln D(h)$ по [2]

Гистограммы оценок коэффициентов амбиполярной диффузии по результатам двухчастотных измерений показаны на рис. 3, 4. Они удовлетворительно согласуются с нормальным распределением.

Экспериментальная зависимость $\ln D_5(h)$ согласуется с теоретическими зависимостями [2, 11], полученными из известных соотношений кинетической теории газов:

$$0,5D = D^* = cT^a \rho^{-1},$$

где T — температура атмосферы; $c = 2,37 \cdot 10^{-6}$, $a = 0,5$ [11]; $c = 3,4 \cdot 10^{-6}$, $a = 1,0$ [2].

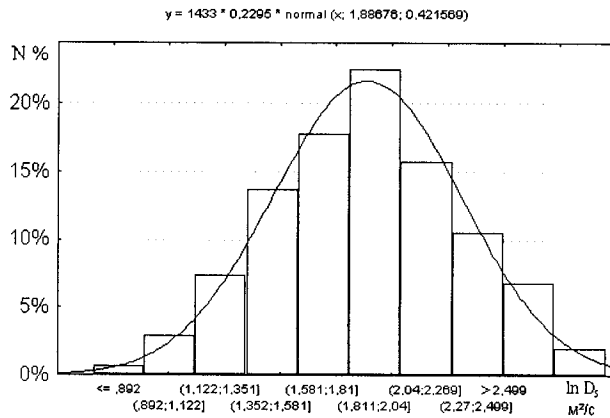


Рис. 3. Распределение коэффициента амбиполярной диффузии $\ln D_5$

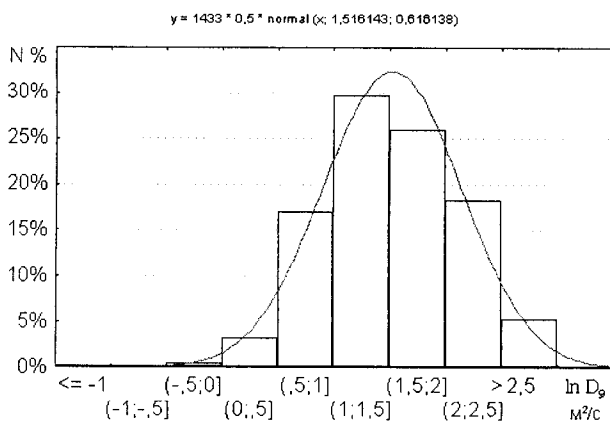


Рис. 4. Распределение коэффициента амбиполярной диффузии $\ln D_9$

Экспериментальная зависимость $\ln D_9(h)$ для всего представленного высотного интервала слабее зависит от высоты, чем теоретические зависимости. Наблюдаемое ослабление высотной зависимости $\ln D_9(h)$ не может быть вызвано только ошибками отбора ненасыщенных метеорных следов.

Рассмотрим причины, приводящие к завышению D_9 на малых высотах и низких скоростях метеорных тел. Объяснить это явление только погрешностями измерений коэффициента диффузии нельзя, поскольку при увеличении высоты и скорости отношение D_9 / D_5 близко к единице (рис. 5, 6). На рис. 7 приведена гистограмма отношения величин D_9 / D_5 . При использовании различных длин волн размеры зон Френеля в следах метеоров будут отличаться. Несоответствие измеряемых D можно отнести за счет влияния неравномерности ионизации вдоль следа, что приводит к увеличению дисперсии результатов измерений. Однако по результатам эксперимента (рис. 5, 6) наблюдается уменьшение дисперсии результатов измерений с ростом высоты регистрации и скорости метеорного тела, что очевидно предполагает наличие дополнительных искажающих факторов.

Возможны следующие причины поведения наблюдаемых значений коэффициента амбиполярной диффузии на разных длинах волн:

- дробление метеорных тел;
- многокомпонентность ионного состава метеорного следа;
- резонанс плазмы метеорного следа.

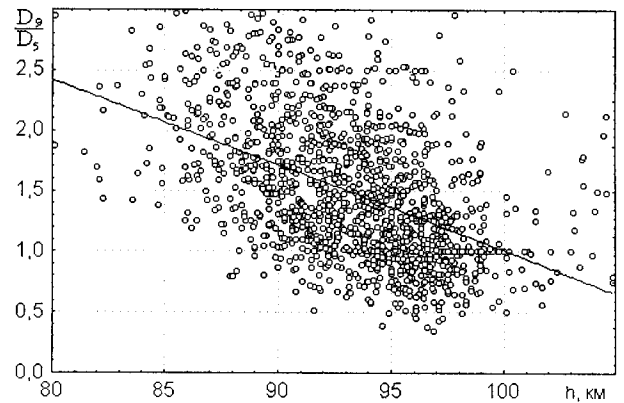


Рис. 5. Поле корреляции отношения D_9 / D_5 на h

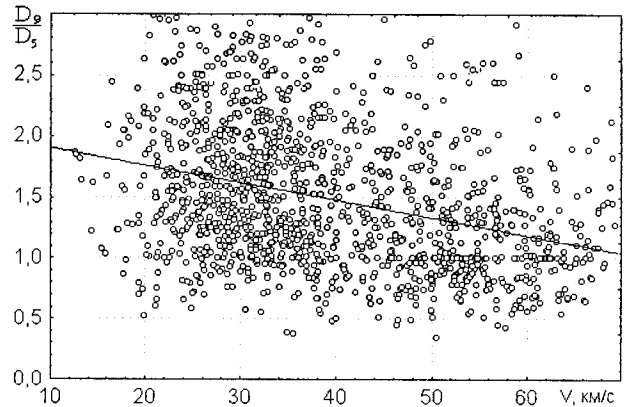


Рис. 6. Поле корреляции отношения D_9 / D_5 на v

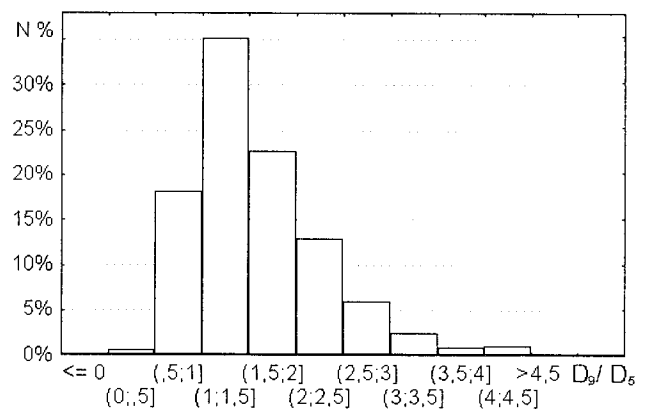


Рис. 7. Гистограмма отношения величин D_9 / D_5

В ряде теоретических и экспериментальных работ [12] показана возможность дробления радиометеоров, причем дроблению подвержены не только рыхлые, пористые метеорные тела, но и плотные. Дробление радиометеоров, в основном, проявляется на низких высотах, поскольку дроблению подвержены метеорные тела с относительно большой массой. В процессе дробления осколки метеорного тела удаляются от оси

следа, образуя шлейф из отдельных осколков. Радиус этого шлейфа по мере удаления от метеорного тела растет. Это приводит к тому, что затухание амплитуд радиоэха происходит под действием двух факторов: радиального расширения следа и уменьшения эффективной отражающей длины первой зоны Френеля. Коэффициент диффузии, найденный на двух длинах волн, будет больше на более длинной волне, поскольку скорость затухания амплитуды радиоэха за счет укорочения длины первой зоны Френеля слабее зависит от длины волны, чем от радиального расширения следа.

Одним из источников дисперсии в индивидуальных значениях измеренного коэффициента амбиполярной диффузии является неравномерное распределение ионизации вдоль следа, имеющей намного меньшие масштабы, чем высота однородной атмосферы. Размеры основных зон Френеля будут большими на больших длинах волн, поэтому наблюдающаяся дисперсия увеличивается по мере увеличения длины волны.

Спектроскопические исследования метеорных следов показали, что они содержат положительные ионы различных сортов. Кроме этого, теоретические работы и лабораторное моделирование метеорных явлений подтвердили наличие 10–15 % (по отношению к положительным ионам) отрицательных ионов. Наличие нескольких сортов ионов с различными подвижностями и полярностями приводит к радиальному распределению электронов, отличному от гауссовского [13]. В присутствии тяжелых ионов амплитуда сигнала убывает медленнее, чем в двухкомпонентной плазме, поскольку тяжелые ионы диффундируют медленнее и, находясь в центре следа, удерживают там электроны, сдерживая падение амплитуды. Амплитуда отраженного сигнала некоторое время спадает по экспоненте, соответствующей коэффициенту диффузии основных, более легких ионов [14], затем она переходит на новую экспоненту с большей постоянной времени, соответствующей коэффициенту диффузии тяжелых ионов. Анализ АВХ, полученных с учетом многокомпонентного ионного состава следа, показывает, что при обработке АВХ по традиционной методике [4] измеряется не истинное значение, а «эффективный коэффициент диффузии» — $D_{\text{эф}}$ [15], который зависит от длины волны. Закон изменения $D_{\text{эф}}(\lambda)$ по результатам этой работы определяется как

$$D_{\text{эф}} \sim \lambda^{0.4}.$$

Однако результаты исследований теоретических работ [13–15] не объясняют того факта, что экспериментально определенные коэффициенты диффузии на двух длинах волн имеют значительные отличия только в области низких высот.

Вероятным механизмом, приводящим к завышению коэффициента диффузии в области низких высот, являются резонансные явления, возникающие при рассеянии электромагнитных волн на ионизированных метеорных следах.

Рассматривая метеорный след как бесконечный плазменный цилиндр в вакууме, на который перпендикулярно его оси падает плоская электромагнитная волна, в [16, 17] численными методами получены коэффициенты обратного рассеяния и фазы рассеянного сигнала в зависимости от безразмерного радиуса

$$A = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r_0^2 + 4Dt}.$$

Рельеф величины поляризационного отношения ρ от линейной электронной плотности и размеров следа представлен на рис. 8 (при значении нормализованной частоты соударений электронов с нейтральными молекулами $\nu = 0,1$). Рисунок построен на основе табулированных значений коэффициента обратного рассеяния при параллельной и перпендикулярной поляризации [17].

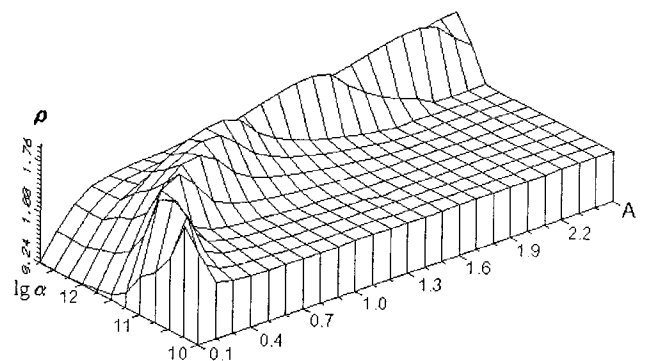


Рис. 8. Рельеф величины поляризационного отношения ρ

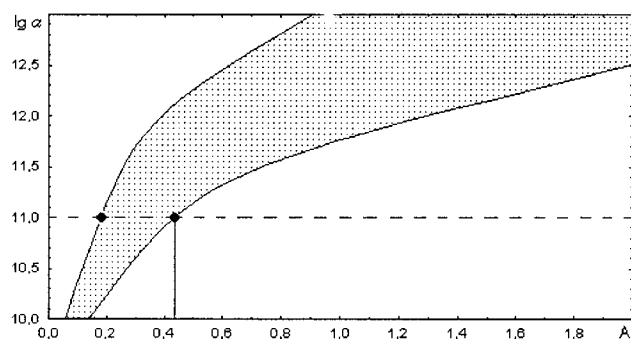
На рис. 9 выделена область существенного уровня резонансных явлений в ионизированном метеорном следе, когда поляризационное отношение превышает величину $\rho = 1,3$. Попытаемся объяснить влияние резонансных явлений на наблюдаемые высотные зависимости амбиполярной диффузии на двух частотах.

На рис. 9 представлена область в координатах $A-h$ (безразмерный радиус метеорного следа — высота) для длины волны 5 м, ограниченная кривыми 1, 2. Кривая 1 описывает в единицах безразмерного радиуса начало диффузионного расширения следа, кривая 2 соответствует моменту времени уменьшения амплитуды АВХ метеорного радиоэха в e раз — то есть времени, необходимому для определения коэффициента амбиполярной диффузии традиционным методом. На рисунке представлена аналогичная область в координатах $A-h$ для длины волны 9 м, ограниченная кривыми 3, 4. Для построения использовались следующие модели начального радиуса и коэффициента амбиполярной диффузии:

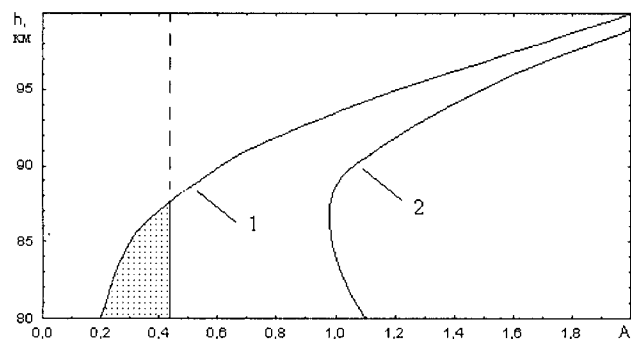
$$r_0 = 0,109 \exp\left(\frac{h-95}{5,45}\right) \nu^{0,65}, \text{ м}; \quad (1)$$

$$D = 8,0 \exp\left(\frac{h-95}{5,45}\right), \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

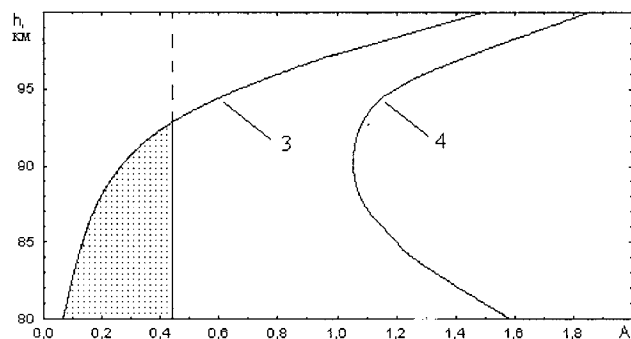
Здесь h — км, ν — км · с⁻¹.



a



б



в

Рис. 9. К объяснению влияния резонансных явлений на наблюдаемую зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты:

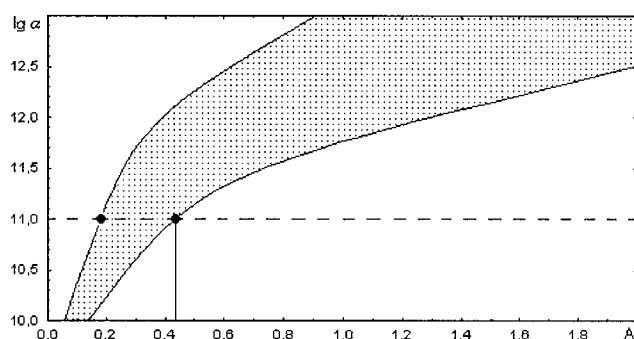
a — область существенного уровня резонансных явлений в ионизированном метеорном следе; *б* — область измерения коэффициента амбиполярной диффузии на длине волны 5 м для модели (3), (2); *в* — область измерения коэффициента амбиполярной диффузии на длине волны 9 м

Также использовалась экспериментальная зависимость высоты отражающей точки метеорного следа от скорости метеорного тела, полученная в [18].

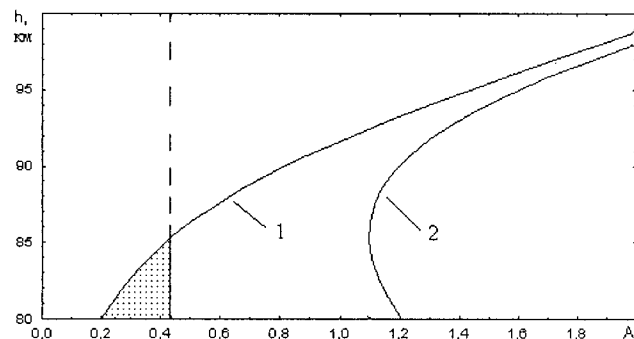
На рис. 10 выполнены аналогичные построения для модели начального радиуса

$$r_0 = C \cdot \exp\left(\frac{h-95}{5,45}\right)^{0,5} \nu^{0,4}, \text{ м.} \quad (3)$$

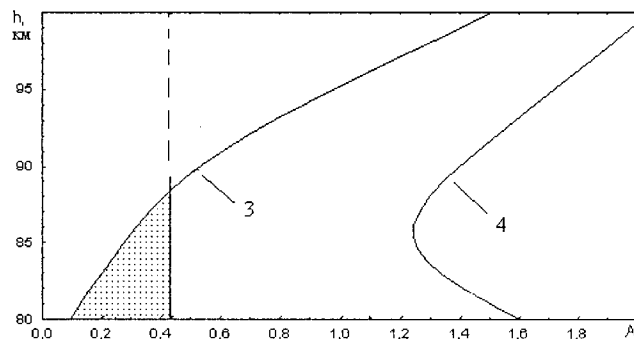
Ограничиваясь рассмотрением метеорных следов с линейными электронными плотностями менее $\alpha < 10^{11}$ эл · см⁻¹, выделим высотно-временные области *R*₅ и *R*₉ на рис. 9, подверженные резонансным эффектам.



a



б



в

Рис. 10. К объяснению влияния резонансных явлений на наблюдаемую зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты:

a — область существенного уровня резонансных явлений в ионизированном метеорном следе; *б* — область измерения коэффициента амбиполярной диффузии на длине волны 5 м для модели (1), (3); *в* — область измерения коэффициента амбиполярной диффузии на длине волны 9 м

Поскольку в наблюдениях мы имеем дело с метеорными следами, ось которых расположена под углом β к плоскости поляризации, то при облучении его электромагнитной волной с горизонтальной поляризацией амплитуда поля, наведенного в приемной антенне, будет определяться как

$$E = E_0 (g_{//}^2 \cos^4 \beta + g_{\perp}^2 \sin^4 \beta + 2 g_{//} g_{\perp} \cos^2 \beta \times \times \sin^2 \beta \cos(\varphi_{//} - \varphi_{\perp}))^{0,5},$$

где E_0 — амплитуда падающего поля, $g_{//}$, $g_{\perp}$ — модули, $\varphi_{//}$, $\varphi_{\perp}$ — фаза коэффициентов отражения для параллельной и перпендикулярной (продольной и поперечной) составляющей. Можно сказать, что огибающая АВХ метеорного следа будет определяться поведени-

ем модулей коэффициентов и фаз коэффициентов отражения для параллельной и перпендикулярной составляющей, а это значит, что эффект резонанса может существенно влиять на форму огибающей метеорного радиоэха. Поскольку в области резонанса поведение $g_{\perp}$ от времени на начальном участке отлично от экспоненциального и имеет завышенное значение по сравнению с $g_{\parallel}$, это приводит к завышению измеряемого значения D_a . То есть высотно-временные области R_5 и R_9 на рис. 9, подверженные резонансным эффектам, соответствуют областям завышенных значений оценок коэффициента амбиполярной диффузии. На рис. 11 приведено поле корреляции h на v массива экспериментальных данных, используемых для оценок коэффициента амбиполярной диффузии. Здесь же нанесены области R_5 и R_9 , определенные ранее на рис. 9.

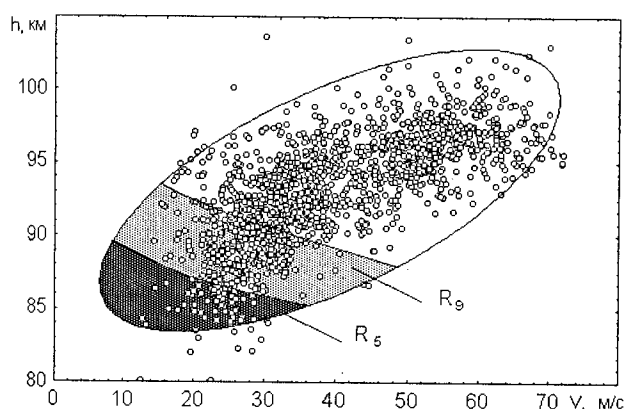


Рис. 11. Поле корреляции h на v массива экспериментальных данных с нанесенными областями R_5 и R_9 , подверженных резонансным эффектам

С увеличением высоты отмечается уменьшение продолжительности резонанса в плазме метеорного следа в связи с уменьшением линейной электронной плотности регистрируемых метеорных следов. Наибольшее влияние резонанс начинает оказывать с понижением высоты регистрации метеорного следа и уменьшением частоты зондирующего сигнала, что хорошо согласуется с наблюдаемыми в эксперименте результатами. Наличие в обрабатываемом материале следов переходного типа будет сильнее подчеркивать наблюдаемое явление, поскольку при увеличении линейной электронной плотности продолжительность резонанса возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал, что резонансные явления в метеорной плазме при отражении радиоволн от метеорных следов оказывают существенное влияние на результаты измерения коэффициента амбиполярной диффузии, выполняемого по традиционной методике.

Литература: 1. Портнягин Ю.И. Об определении параметров верхней атмосферы с помощью измерений коэффициента амбиполярной диффузии методом радиолокации ме-

теорных следов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1972. — № 3. — С. 464–467. 2. Портнягин Ю.И. Определение параметров атмосферы методом радиолокации метеорных следов // Физика верхней атмосферы. Труды ИЭМ, вып. 24. — С. 57–85. 3. Лебединец В.Н., Соснова А.К. Отражение радиоволн от метеорных следов. II. Дифракционные картины // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1969. — № 4. — С. 680–688. 4. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Наука, 1967. — 260 с. 5. Чумак Ю.В., Мойся Р.И. Рассеяние радиоволн плазменным цилиндром // Изв. ВУЗов. Радиофизика. — 1977. — т. 20, № 1. — С. 51–55. 6. Чумак Ю.В. Взаимодействие радиоволн с плазмой метеорного следа: Дисс. ... канд. физ. мат. наук: 01.04.03 К., 1979. — 189 с. 7. Кащеев Б.Л., Жуков В.В. Автоматический угломер. Сообщение 1. Принцип построения // Радиотехника. 1978. — Вып. 47. — С. 3–9. 8. Жуков В.В., Олейников А.Н., Олейников В.Н. Автоматический угломер. Сообщение 2. Предварительная обработка сигналов // Радиотехника. 1978. — Вып. 47. — С. 9–14. 9. Олейников В.Н., Олейников А.Н., Жуков В.В. Автоматический угломер. Сообщение 3. Первичная обработка сигналов // Радиотехника. 1979. — Вып. 50. — С. 72–78. 10. Олейников В.Н. Эффективность критериев отбора ненасыщенных метеорных следов // Метеорные исследования. — М.: ВИНТИ. — 1985. — № 10. — С. 53–58. 11. Greenhow J.S. Newfeld E.L. The diffusion of ionized trails in upper atmosphere. — J. Atmos. Terr. Phys., 1955, vol. 6, № 2,3, p. 133–140. 12. Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 247 с. 13. Новиков Г.Г., Цыганков С.Р., Блохин А.В. О диффузии метеорной плазмы, содержащей два сорта ионов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1981. — Т. 21. — № 21. — С. 105–109. 14. Новиков Г.Г., Цыганков С.Р. Об отражении радиоволн от метеорного следа, содержащего два сорта ионов // Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика. — 1981. — Т. 24. — № 12. — С. 1459–1466. 15. Новиков Г.Г., Рубцов С.Ф. О зависимости эффективного коэффициента диффузии, определяемого по радиометеорным данным, от длины волны // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1982. — Т. 22. — № 2. — С. 867–868. 16. Чумак Ю.В., Мойся Р.И., Слюсаренко И.И. Поляризационные эффекты при взаимодействии радиоволн с метеорными следами // Метеорные исследования. — 1979. — № 6. — С. 33–38. 17. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с ионизированными следами в ионосфере («Ракурс»): Отчет о НИР (промежуточный) / Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко. — К., — 1982. — 97 с. 18. Олейников В.Н. Начальный радиус метеорного следа и его влияние на замечаемость радиолокационных метеоров: Дисс. ... канд. техн. наук — Харьков, 1983. — 270 с.

Поступила в редколлегию 08.07.2004

Олейников Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доц. кафедры РЭС ХНУРЭ. Область научных интересов: антенно-фидерные системы радиолокационных станций, исследования атмосферы, радиометеорные исследования, обработка и анализ результатов.



Евсеев Дмитрий Борисович, аспирант кафедры РЭС, ХНУРЭ. Область научных интересов: антенно-фидерные системы радиолокационных станций, исследования атмосферы, радиометеорные исследования, обработка и анализ результатов.