

И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов

Анализ распределений амплитуды акустических эхосигналов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.05.2001 г.

Рассмотрены результаты статистической обработки огибающей узкополосного звукового сигнала, принимаемого акустическим метеорологическим локатором (содаром). Проведена проверка гипотез о законе распределения огибающей на разных высотах в различных геофизических условиях. Установлено, что при конвективном режиме пограничного слоя атмосферы в его нижней части экспериментальные гистограммы лучше всего согласуются с гамма-распределением, а в вышележащих слоях хорошо аппроксимируются логнормальным законом. В условиях устойчивой стратификации огибающая регистрируемых сигналов чаще всего подчиняется гамма-распределению. Какие-либо закономерности в распределении внешних (акустических) шумов не установлены.

Интерес к статистическим свойствам акустических сигналов может быть связан не только с изучением фундаментальных процессов распространения звука в атмосфере как случайно-неоднородной движущейся стратифицированной среде, но и с прикладными задачами, ориентированными на исследование среды распространения по эффектам ее воздействия на различные параметры сигналов. В классической теории рассеяния [1] принято, что в силу предельной теоремы теории вероятностей рассеянное поле является гауссовым, амплитуда огибающей распределена по закону Рэлея, а фаза распределена равномерно в интервале $(-\pi, \pi)$. Общая цель нашей работы заключалась в экспериментальной проверке постулируемых положений на основе результатов дистанционной акустической диагностики атмосферного пограничного слоя (АПС).

Ряд работ, опубликованных в печати, также посвящен изучению вероятностных характеристик сигналов при акустическом зондировании, в частности исследованию статистик амплитуды A и ее квадрата. Большое внимание уделялось изучению статистических свойств структурной характеристики температуры C_T^2 , связанной с квадратом амплитуды соотношением $A^2 = \gamma C_T^2$, где γ – некоторый коэффициент. Так, еще в работах [2–4] утверждается, что структурная характеристика температурного поля C_T^2 распределена по логнормальному закону. Причем этот вывод распространяется как на конвективные условия АПС, так и на случай устойчивой стратификации. Иные выводы сделаны в работе [5], где показано, что закон распределения величины $\lg C_T^2$ отличается от нормального и является асимметричным. Более того, в этой работе рассмотрены бимодальные экспериментальные гистограммы $\lg C_T^2$ и дается возможная геофизическая интерпретация такого случая. О негауссовом распределении C_T^2 , точнее величины $(C_T^2 - \bar{C}_T^2)/\bar{C}_T^2$, при конвекции говорится в работе [6]. Отмечается, что асимметрия на высоте 39 м составляет 0,6, а на высоте 95 м близка к 1,7.

Исследованию распределений амплитуды рассеянных атмосферой и принятых содаром акустических сигналов посвящены, в частности, работы [7, 8]. Анализ результатов зондирования летом в степном районе привел авторов [7] к выводу, что на высоте 48 м распределение $\lg A$ не подчиняется нормальному закону. Отмечается также, что формы распределений флуктуаций амплитуды сигнала практически неразличимы для условий конвекции и устойчивой стратификации. Эти же выводы следуют и из работы [8], где рассмотрены те же, что и в работе [7], экспериментальные данные, но для разных высот в условиях конвекции. Гипотезы о форме распределений $\lg A$, как в [7], так и в [8], не проверялись.

Важное место при анализе статистических свойств сигналов, регистрируемых в процессе акустического зондирования АПС, занимает исследование шумов. Так, в работе [3] делается вывод о том, что распределение логарифма мощности узкополосных шумов подчиняется нормальному закону. Детальный анализ экспериментальных данных с использованием проверки статистических гипотез о форме распределений амплитуды шумов на разных частотах в узких полосах проведен в работе [9]. Утверждается, что в большинстве случаев (54%) имеет место логнормальное распределение. Довольно

часто (26%) встречается гамма-распределение. Распределения Максвелла, Рэлея, Вейбулла и Гаусса соответствовали нескольким процентам реализаций. Для проверки статистических гипотез применялся критерий согласия Колмогорова–Смирнова с уровнем значимости 0,05.

Краткий обзор литературы показывает, что, несмотря на определенное внимание к проблеме статистических свойств рассеянных акустических сигналов, ее решение еще далеко от завершения, а некоторые выводы и гипотезы требуют дополнительной проверки и подтверждения. В публикуемой работе мы поставили задачу более детально проанализировать экспериментальные гистограммы амплитуды огибающей рассеянного узкополосного сигнала, проверить гипотезы их соответствия некоторым теоретическими законами распределений вероятностей, а также выявить особенности установленных распределений в различных геофизических условиях.

Для исследования статистических свойств акустических сигналов, получаемых с помощью содара ИОА СО РАН «Волна-3», нами были отобраны группы типичных наблюдений, сделанных в пригороде Томска во все сезоны года. При этом группа весенне-летних записей характеризовалась хорошо развитой конвекцией, а осенне-зимних – наличием температурной инверсии. Группы наблюдений формировались так, чтобы текущая геофизическая ситуация в целом обладала стационарностью на всем интервале обработки. Для сопоставления результатов по статистике амплитуд сигналов при других географических условиях нами были использованы данные, полученные во время работы содара на полигоне в степном районе Оренбургской области летом 1999 г. Основные характеристики содара «Волна-3» опубликованы в статье [10]. Отметим лишь, что все обработанные и представленные здесь измерения проводились при длительности зондирующего импульса 150 мс и полосе цифрового фильтра 34 Гц вертикального канала зондирования (центральная частота фильтра 1700 Гц).

Все реализации формировались как срезы данных на различных высотах за временные интервалы от 4 до 7 ч (число точек в них варьировалось от 1000 до 3000), что при условии стационарности позволяло нам считать статистически обеспеченными выводы о характере распределения этих выборок. При анализе высотно-временных распределений огибающих узкополосных сигналов выделялись три характерных участка, соответствующих: 1) области, где проявляются сильные эхосигналы от окружающих содар зданий (так называемые «местники»), 2) области полезного сигнала в смеси со случайным внешним шумом, 3) области шума при отсутствии полезного сигнала. На рис. 1,а–4,а представлены примеры факсимильных записей анализируемых групп в условиях инверсии температуры (рис. 1,а и 4,а) и развитой конвекции (рис. 2,а и 3,а).

При обработке экспериментальных данных применялся стандартный пакет программ (СПП) STATISTICA. Его использование оправдано, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, удобный интерфейс СПП позволяет исключительно эффективно провести обработку большого массива экспериментальных данных. Во-вторых, используя СПП, доступный для всех исследователей, мы тем самым можем надеяться на адекватную проверку наших выводов широким кругом заинтересованных лиц.

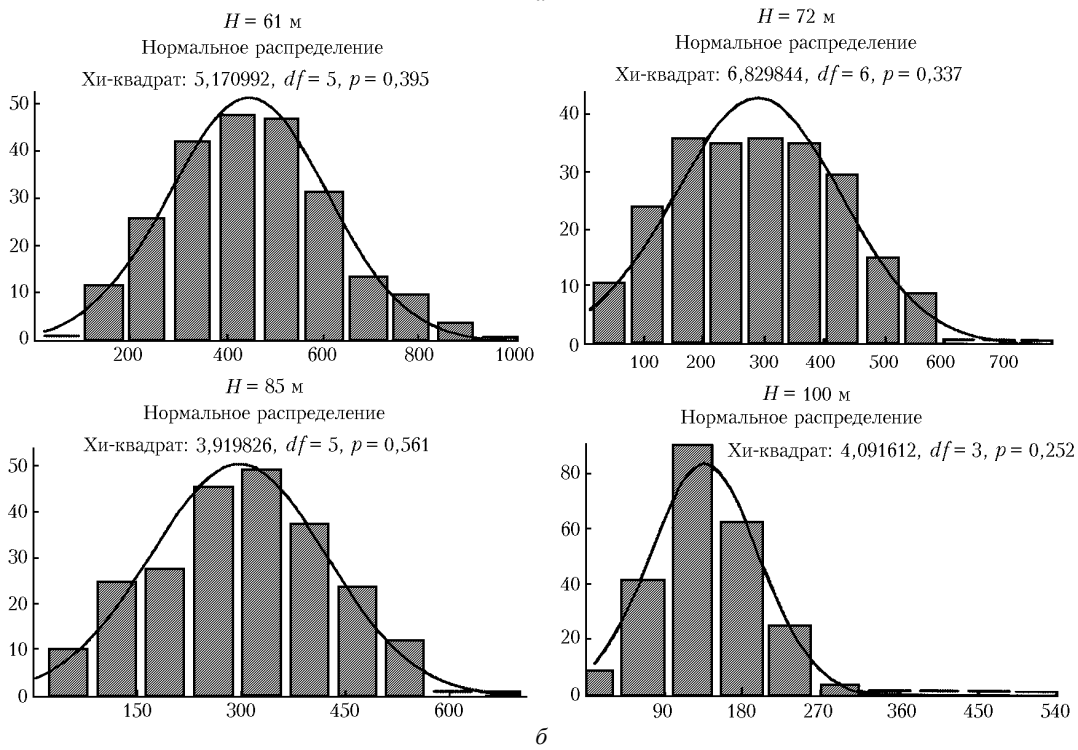
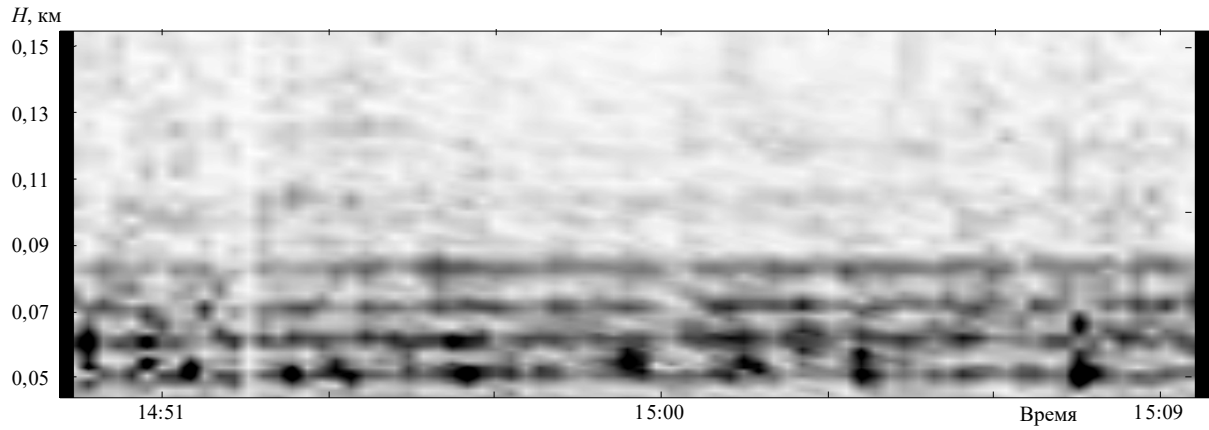


Рис. 1. Факсимильная запись (а) и четыре гистограммы огибающей с нанесенными аппроксимирующими кривыми (б), полученные за часовой интервал (выборка по 232 отсчетам). Период послыски зондирующего импульса составлял примерно 16 с. Измерения проведены 6 января 2000 г. в Томске при близких к шторму условиях и устойчивой стратификации

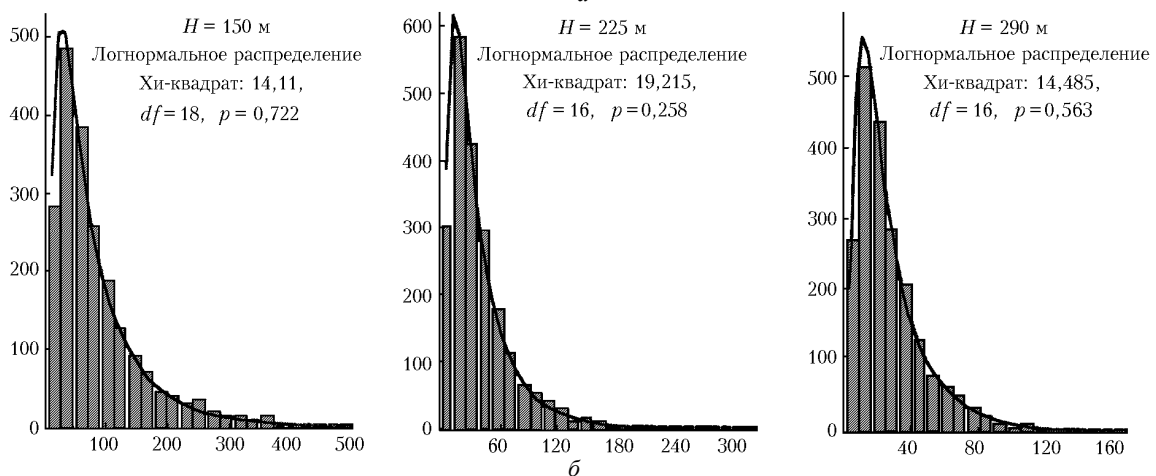
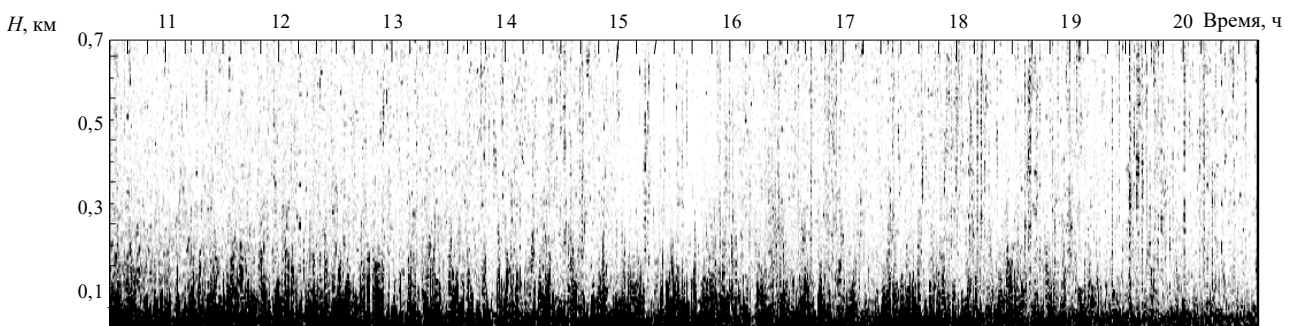


Рис. 2. Факсимильная запись (а) и три гистограммы огибающей с нанесенными аппроксимирующими кривыми (б) по измерениям в Томске 25 мая 2000 г. Период послыски импульса был близок к 17 с. Объем выборки при построении гистограмм – 2139 отсчетов

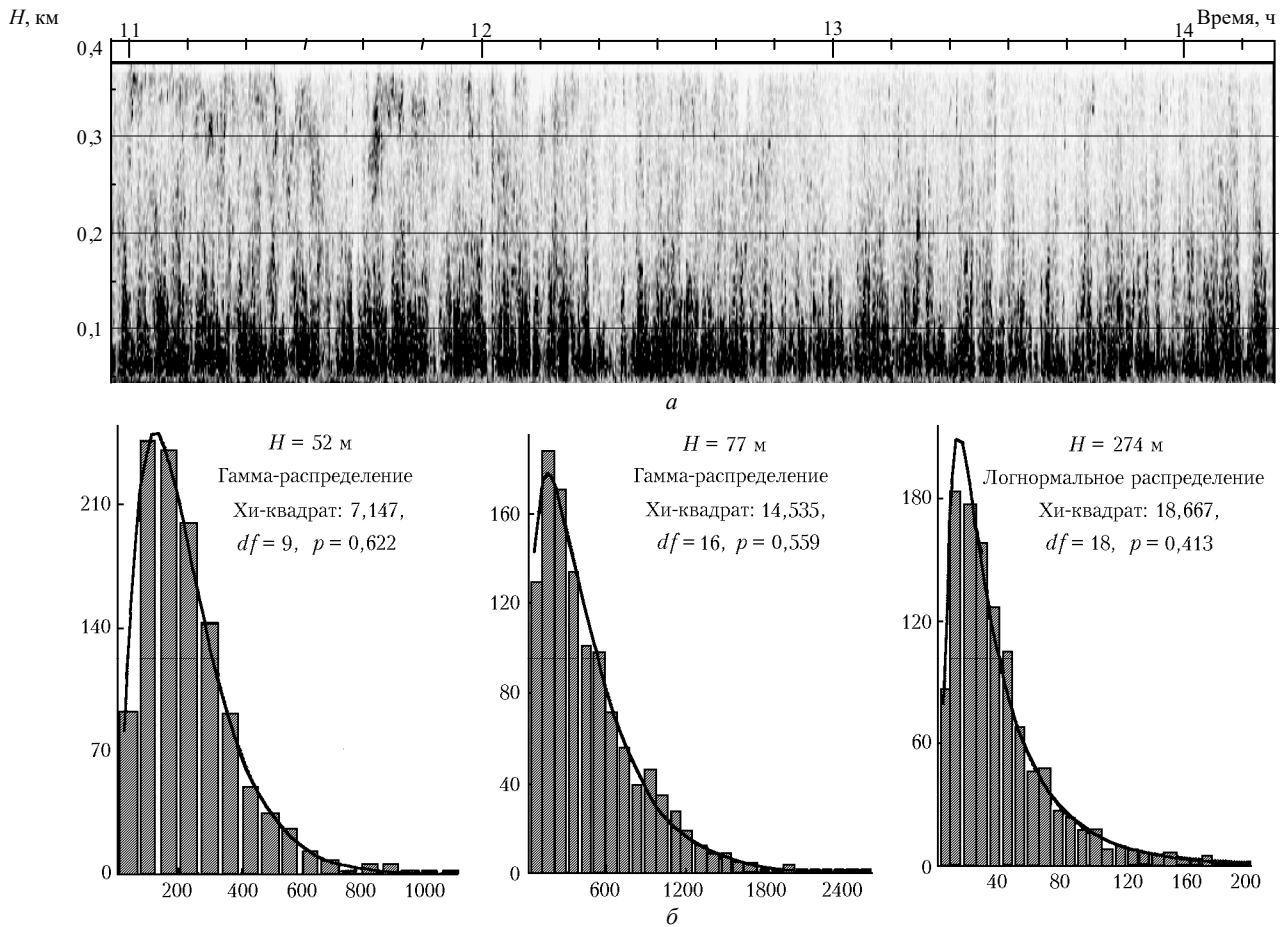


Рис. 3. Факсимильная запись (а) и три гистограммы огибающей с нанесенными аппроксимирующими кривыми (б) по измерениям в степном районе 1 июня 1999 г. Период послышки импульса чуть более 10 с. Объем выборки при построении гистограмм – 1154 отсчета

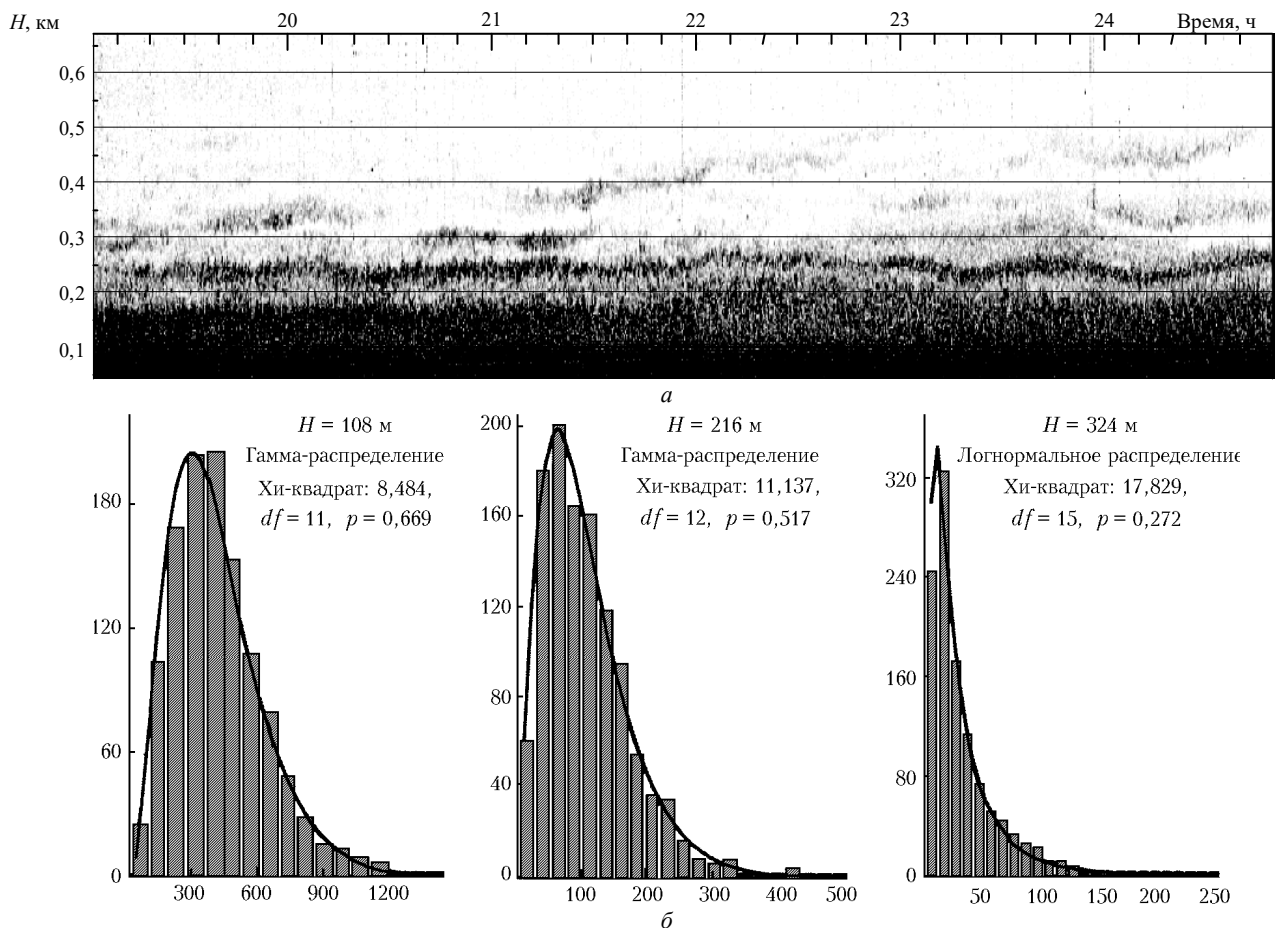


Рис. 4. Факсимильная запись (а) и три гистограммы огибающей с нанесенными аппроксимирующими кривыми (б) по измерениям в Томске 4 января 2000 г. Период послышки импульса составлял примерно 18 с. Объем выборки – 1158 отсчетов

С целью проверки гипотез о соответствии огибающих тем или иным теоретическим законам распределений нами был выбран критерий согласия – хи-квадрат, как наиболее жесткий из предлагаемых в меню СПП. Для аппроксимации экспериментальных гистограмм использовались распределе-

ния: Рэлея, гамма-, логнормальное, нормальное, Вейбулла, хи-квадрат, экспоненциальное.

Записи амплитуды, полученные при работе содара в Томске, в диапазоне высот до 100 м всегда содержат отражения от близлежащих зданий. На рис. 1,б приведены примеры экспе-

риментальных гистограмм сигналов, отраженных от зданий, а также наложенные на них теоретические кривые, для которых получена наилучшая подгонка. Здесь и на всех последующих рисунках с гистограммами приведены копии графиков, генерируемых СПП. По оси абсцисс отложены значения цифрового аналога амплитуд сигналов в относительных единицах, а по оси ординат – частота попадания амплитуд в заданные интервалы. Над каждой гистограммой приводится высота H , для которой проведена проверка закона распределения. Указан также вид распределения и параметры подгонки к нему по критерию согласия хи-квадрат: значение хи-квадрат, число степеней свободы (df) и вероятность (p) того, что мера расхождения теоретического и экспериментального распределений, подчиняющаяся закону хи-квадрат, за счет чисто случайных причин превзойдет фактически наблюдаемое в данной выборке значение хи-квадрат [11]. Следует отметить, что величина p , превышающая 0,1, рассматривается на практике как достаточно высокая для того, чтобы принять гипотезу. В то же время уровень $p > 0,9$ может свидетельствовать о неслучайности выборки.

В соответствии с приведенными на рис. 1,б результатами, а также по данным анализа большого количества других аналогичных ситуаций можно сделать вывод, что огибающие отраженных от неподвижных объектов сигналов имеют распределение, близкое к нормальному закону. Эксцессы и коэффициенты асимметрии в этих случаях стремятся к нулю, что также свидетельствует о близости выборок к нормальному закону распределений. Проверка на соответствие другим законам распределений дает значения $p \ll 0,1$.

Совсем другая картина на участках, соответствующих «смешанным» областям, где присутствуют и сигнал и шум. Рассмотрим записи, полученные в условиях хорошо развитой конвекции (см. рис. 2 и 3). Коэффициенты асимметрии здесь положительны и меняются обычно в диапазоне от 0 до 4. Эксцессы больше нуля и имеют сильный разброс. По результатам анализа большого количества записей за весенне-летние сезоны (в режимах конвекции) можно сделать следующий вывод. В подавляющем большинстве случаев (до 90%) на высотах более 100 м имеет место хорошее согласование экспериментальных данных с логнормальным законом распределения. До 5% рассмотренных записей имели гамма-распределение. Распределения Рэлея и Вейбулла встречались очень редко. Имелись случаи, когда ни одно из распределений не подходило. На рис. 2,б представлены типичные примеры обработки для конвективных условий пригорода Томска.

Сигналы, полученные содаром днем в степном районе при достаточно слабых внешних шумах, можно с уверенностью отнести к классическому образцу развитого конвективного режима. На нижних высотах (до 100 м), где практически всегда присутствует рассеивающая звук температурная турбулентность, экспериментальные гистограммы хорошо согласовывались с гамма-распределением. По мере роста высоты изменялась статистика амплитуды – гистограммы лучше всего аппроксимировались логнормальным законом. В качестве примера на рис. 3,б представлены результаты сравнения законов распределения выборок, взятых на разных высотах.

Сопоставляя наши результаты с выводами работ [7, 8] для конвективных условий, можно прийти к заключению, что в приземном слое атмосферы распределение $\lg A$ действительно не подчиняется нормальному закону. Однако на больших высотах, по нашим данным, в отличие от результатов работы [8], $\lg A$ имеет распределение, близкое к нормальному закону. Это противоречие требует дополнительных исследований.

Хотелось бы обратить внимание и на возможную проблему, возникающую при высокой скорости повторения посылок зондирующих импульсов. Если частота посылки не согласована с протяженностью рассеивающей области АПС, то в каждый момент амплитуда регистрируемого сигнала будет содержать добавку за счет рассеяния предыдущего зондирующего импульса на больших высотах. Такой эффект, возможно, имеет место в работах [7, 8], где период посылки составлял в некоторых дневных экспериментах 1 с (предельная высота зондирования порядка 170 м), а протяженность рассеивающих областей достигала в этих условиях, судя по приведенным факсимильным записям, 500 м и более. Эта же проблема могла проявиться и в работе [5], где период повторения зондирующих импульсов также составлял 1 с. Естественно, что статистика $\lg A$ и $\lg C_T^2$ несколько искажается данным эффектом.

Рассмотрим теперь статистику сигналов в условиях устойчивой температурной стратификации. Большое количество экспериментального материала, особенно в зимний период, позволило нам обработать множество однотипных ситуаций и прийти к определенным выводам. В частности, коэффициенты асимметрии лежат, как правило, в пределах от 1 до 4, эксцессы положительны, но не имеют такого большого разброса, как в случаях конвекции. Подбирая условия, где соблюдалась относительная стационарность амплитуды на заданных высотах, мы аппроксимировали экспериментальные распределения вышеупомянутыми теоретическими законами.

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы. В областях с высокой интенсивностью турбулентности наблюдается хорошее согласование гистограмм огибающих с гамма-распределением. В переходных зонах, т.е. на участках записи, где проходит граница областей полезного сигнала и шума, имеет место согласие с логнормальным законом распределения. Можно утверждать, что в 90% рассмотренных реализаций (при температурных инверсиях) амплитуда сигнала имеет гамма-распределение.

К оставшимся 10% относятся случаи, когда сигнал подчинялся логнормальному закону (порядка 5%) либо вообще не подпадал ни под один из рассмотренных законов. Отметим также, что распределение Рэлея встречалось лишь в единичных реализациях. На рис. 4,б приведены примеры согласования логнормального и гамма-распределений с экспериментальными гистограммами огибающей узкополосного сигнала, принятого с различных высот в условиях устойчивой температурной стратификации.

Как уже отмечалось выше, из теории следует [1], что огибающая рассеянного узкополосного акустического сигнала распределена по закону Рэлея. Однако наши экспериментальные результаты и результаты наших коллег (см., например, [7, 8]) не совпадают с этим предположением. В настоящее время мы не имеем какой-либо приемлемой гипотезы, объясняющей причины формирования разных законов распределений вероятностей огибающей принятого содаром сигнала. Напомним, что обычно гамма-распределение реализуется в ситуациях, когда анализируемая величина является суммой независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону. Логнормальное распределение вероятности в статистической радиофизике часто используется при изучении сигналов в каналах связи с рассеянием, при исследовании статистики вблизи нижнего физического предела величин, при аппроксимации помех различной природы.

Отметим также, что параметры гамма-распределения, получившиеся в результате подгонки теоретической кривой к экспериментальным гистограммам, не сводили данное распределение вероятностей к какому-либо иному закону (хи-квадрат, экспоненциальному и др.) при всех типах стратификации.

В процессе статистического анализа сигналов в условиях конвективного режима нами была сделана попытка устранить «нестационарность» амплитуды сигналов на определенной высоте. Дело в том, что при относительно коротких интервалах времени поведение сигнала на какой-либо выделенной высоте в условиях конвекции можно считать нестационарным, так как «конвективные перья» чередуются с «пустотами» (см. рис. 2,а и 3,а). Для устранения влияния такой перемежаемости была видоизменена методика обработки сигнала. Мы избавлялись от «пустот» программно, пропуская их в выборке согласно порогу, связанному с текущим уровнем шумов. Полученный «чистый» сигнал подвергался аппроксимации теми же теоретическими законами. В результате, подчиняясь изначально, например, логнормальному распределению, после такой «фильтрации» выборка переставала подчиняться как данному закону, так и любому другому из перечисленных нами выше, включая закон Рэлея. Отсюда следует, что подобная операция существенно нарушает статистические свойства огибающей и не может быть применена при ее исследовании.

Обратим также внимание на участки записей, соответствующие концу трассы зондирования. Здесь, как правило, отсутствует полезный сигнал и доминируют шумы. Проанализировав большое количество реализаций, мы пришли к выводу, что какого-либо определенного закона распределения амплитуды зарегистрированных содаром шумов не наблюдается. Данный вывод отличается от результатов работы [9], где утверждается, что распределение

амплитуды шумов в основном подчиняется логнормальному закону. Возможно, это связано с применением нами более жесткого критерия согласия хи-квадрат, в отличие от авторов [9], которые использовали критерий Колмогорова–Смирнова при уровне значимости 0,05.

В результате проведенного анализа можно сделать некоторые выводы:

1. Вне зависимости от стратификации пограничного слоя атмосферы огибающая отраженного от неподвижного объекта сигнала имеет близкий к нормальному закон распределения. Это объясняется тем, что в сигнале имеются регулярные составляющие, преобладающие над случайными, а в этом случае закон распределения стремится к нормальному [12].

2. При отсутствии полезного сигнала, т. е. при анализе шумов, не найдено какого-либо определенного закона распределения ни для одной из рассмотренных ситуаций.

3. Закон распределения огибающих сигнала зависит от атмосферной стратификации:

– в условиях конвекции амплитуда огибающей принятого содаром узкополосного акустического сигнала, прошедшего из областей выше приземного слоя, в подавляющем большинстве случаев распределена по логнормальному закону; в приземном слое она имеет гамма-распределение;

– в условиях температурной инверсии амплитуда принятого сигнала в основном подчиняется гамма-распределению, а вблизи границ рассеивающих областей согласуется с логнормальным законом.

Авторы благодарны В.А. Федорову за ряд полезных замечаний и советов при подготовке данной статьи.

1. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.

2. *Ming-yu Zhou, Nai-ping Lu, Yan-juan Chen.* The detection of the temperature structure coefficient of the atmospheric boundary layer by acoustic radar // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. V. 68. № 1. P. 303–308.
3. *Melling H., List R.* Acoustic Doppler sounding of falling snow // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. № 9. P. 1267–1273.
4. *Melling H., List R.* Doppler Velocity Extraction from Atmospheric Acoustic Echoes Using a Zero-Crossing Technique // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. P. 1274–1285.
5. *Petenko I.V., Shurygin E.A.* Probability distribution of echo-signal intensity in the convective atmospheric boundary layer // *Proc. 8th Int. Symp. on Acoust. Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans.* М., 1996. P. 6.47–6.52.
6. *Nair K.N., Kunhikrishnan P.K., Gupta K.S., Ramachandran R.* Study of vertical wind and temperature turbulence in a convective boundary layer from sodar observation at Thumba // *Indian J. Radio and Space Phys.* 1989. V. 18. P. 157–159.
7. *Каллистратова М.А., Нестерова Т.Н., Петенко И.В., Смирнов А.С., Тиме Н.С., Шурыгин Е.А.* Измерение статистических характеристик эхосигнала при акустическом зондировании атмосферы // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1986. Т. 22. № 9. С. 987–990.
8. *Тиме Н.С., Шурыгин Е.А., Нестерова Т.Н.* Переменяемость турбулентности и флуктуации эхосигнала при акустическом зондировании конвективной атмосферы // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1987. Т. 23. № 1. С. 21–28.
9. *Сидоров Г.И., Сидько В.И.* Теоретическое и экспериментальное исследование статистических характеристик акустических помех // *V Всес. симп. по лазер. и акуст. зонд. атм.: Тезисы докл. (часть III): Томск: Изд. ИОА СО СССР, 1978. С. 97–100.*
10. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А.* Акустический доплеровский локатор «Волна-3» // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
11. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
12. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 655 с.

I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Analysis of distribution of the acoustic echo-signal amplitudes.

We present results of statistical processing of the envelope of a narrow-band sonic signal received by an acoustic meteorological radar (sodar). Hypotheses on the distribution law of the envelope at different altitudes under different geophysical conditions were checked. It was found that in the convective mode, the experimental histograms in lower part of the boundary atmospheric layer are best described by the gamma-distribution and in its higher layers – by the lognormal distribution. Under conditions of stable stratification, the envelope most often obeys the gamma-distribution. No regularities in distribution of the external (acoustic) noises were found.