

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

В.И. ЛЕОНИДОВ

Рассматривается возможность оптимизации процедуры синтеза профиля температуры по данным радиоакустического и акустического зондирования в комплексной радиотехнической системе дистанционного зондирования пограничного слоя атмосферы.

The opportunity of optimizing temperature profile synthesis procedure by radioacoustic and acoustic sounding data in a complex radioengineering system of atmospheric boundary layer remote sounding is considered.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка радиоэлектронных средств, позволяющих контролировать состояние атмосферы пограничного слоя (АПС) в мезометеорологическом масштабе флуктуаций метеовеличин, является актуальной задачей, имеющей определяющее значение для решения задач краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозирования состояния АПС в слое высотой до 600 м. К таким задачам относятся: предсказание величины сдвигов горизонтальной скорости ветра; обнаружение вертикальных воздушных потоков, которые могут составлять опасность для взлета и посадки самолетов; слежение за процессом распространения аварийных вредных выбросов; предсказание траекторий распространения радиоволн и т.п. Анализ результатов использования систем радиоакустического (РАЗ) и акустического (АЗ) зондирования, используемых в настоящее время для решения этих задач, показывает, что эти системы, применяемые раздельно как средства оценки параметров АПС, имеют принципиальные ограничения.

Цель настоящей работы — проанализировать новые возможности по исследованию АПС, возникающие при комплексном использовании систем РАЗ и АЗ.

1. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ РАЗ И АЗ

В системах РАЗ достаточный для приема уровень сигнала достигается при обеспечении условия Брега, определяющего соотношение между длинами электромагнитной λ_e и звуковой λ_s волн и углом падения φ электромагнитной волны на звуковую [1]:

$$2\lambda_s \cos \varphi = \lambda_e. \quad (1)$$

Ограничения на угол φ определяются выражением $\operatorname{tg} \varphi \leq a_s / l_s$, где a_s — поперечный размер импульсного объема звукового сигнала, l_s — размер импульсного объема звукового сигнала вдоль направления распространения. Развитая турбулентность в поле температуры приводит к случайному характеру нарушений условия когерентного суммирования эхо-сигналов (1), рассеянных отдельными элементами акустического им-

пульса. Мощность принятого сигнала при форме огибающей амплитуды акустического импульса в виде кривой Гаусса согласно [2] может быть записана в виде:

$$Pr = I_0 N^2 \exp(-4\pi^2 N^2 \Lambda^2 \lambda_e^{-2}), \quad (2)$$

где N — количество периодов в акустическом импульсе, $N = l_s / \lambda_s$; I_0 — параметр, зависящий в данном случае от мощности акустического и радиоизлучений, усиления антенн, расстояния, с которого ведется прием, и зависимости диэлектрической проницаемости воздуха от звукового давления, $\Lambda = |2\lambda_s - \lambda_e|$.

На рис. 1 приведены зависимости отношения мощности принятого электромагнитного сигнала к его мощности при $\Lambda = 0$ как функции температуры воздуха рассчитанные по выражению (2) для двух значений N : $N=25$ и $N=100$. На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для трех значений N : $N=25$, $N=100$ и $N=200$, рассчитанные для прямоугольной формы огибающей акустического импульса, при которой экспонента в выражении (2) заменяется на функцию вида:

$$F(x) \in \sin(x)/x, \quad (3)$$

где $x = \pi N \Lambda / \lambda_e$.

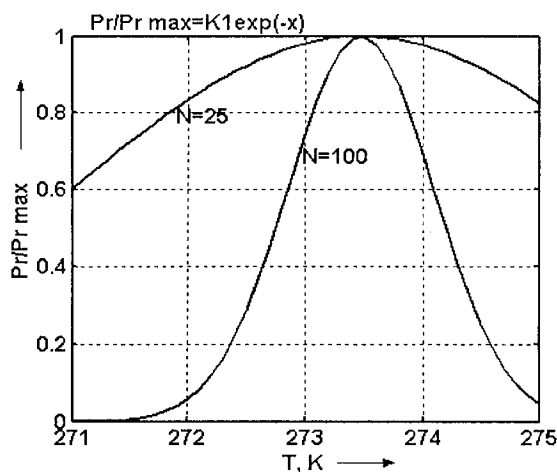


Рис. 1

Из этих расчетов следует, что при использовании умеренной мощности излучаемого радиосигнала по-

рядка 10 Вт и соответственно $N = 100 \div 200$ диапазон температуры воздуха, при котором рассогласование в условии (1) приводит к допустимому ослаблению эхо-сигнала, оказывается относительно небольшим: $\Delta T \approx \pm 0,5^\circ\text{C}$. Пульсации температуры такого порядка наблюдаются в АПС при развитой конвекции или температурной инверсии со сдвигом ветра. На рис. 3 представлен пример измерений «мгновенных» значений температуры, приведенный в [3]. Исходя из этого, можно считать, что в общем случае проведение измерений вертикальных профилей температуры системой РАЗ допустимо только при невозмущенных условиях АПС, при которых амплитуда пульсаций температуры не превышает $0,5^\circ\text{C}/\text{мин}$.

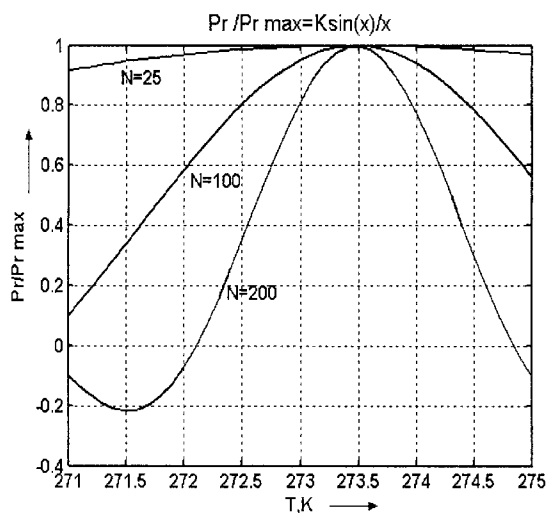


Рис. 2

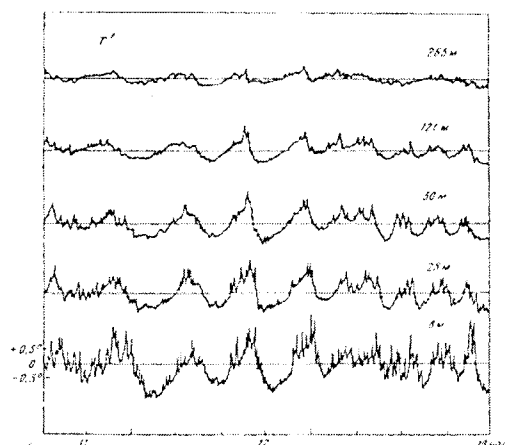


Рис. 3

В системах акустического зондирования величина удельной мощности обратного рассеяния из импульсного объема (эффективное сечение рассеяния) σ дается известным [4] выражением:

$$\sigma = 2\pi k^4 \frac{\Phi_T(2k)}{4T^2}. \quad (4)$$

Здесь $k = 2\pi/\lambda_{\text{зв}}$, $\lambda_{\text{зв}}$ — длина волны звука; T — среднее значение температуры в рассеивающем объеме;

Φ_T — трехмерная спектральная плотность турбулентных пульсаций поля температуры при пространственном волновом числе K , $K = 2k$ или $K = 2\pi/l$, где $l = \lambda_{\text{зв}}/2$ — пространственный масштаб турбулентных пульсаций температуры. Из выражения (4) следует, что мощность акустических эхо-сигналов в среднем растет с увеличением амплитуды турбулентных пульсаций температуры при пространственном масштабе $l = \lambda_{\text{зв}}/2$.

Таким образом, для оптимизации процедуры определения профиля температуры могут быть использованы взаимно противоположные свойства систем радиоакустического и акустического зондирования — в зонах развитой турбулентности наблюдается интенсивный акустический эхо-сигнал и разрушается радиоакустический, а в невозмущенных зонах акустический сигнал отсутствует, но наблюдается радиоакустический эхо-сигнал.

2. СТРУКТУРА АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭХО-СИГНАЛОВ

Интенсивность и пространственно-временная структура турбулентности определяется балансом и притоком тепла в АПС. Следовательно, целесообразно исследовать возможности систем дистанционного зондирования АПС относительно известных типов термодинамических состояний.

А. Вынужденная конвекция. Это механическая конвекция под действием, например, сдвига ветра. Сдвиг ветра возникает за счет трения потока о подстилающую поверхность, вблизи которой скорость всегда равна нулю. При таком состоянии приток тепла осуществляется только через диссипацию кинетической энергии движения в тепло за счет молекулярных сил трения в вязкой подповерхности. Согласно [5] периоды пульсаций метеовеличин находятся в пределах: $10^{-4} \text{ ч} (0,36 \text{ с}) < \tau < 10^{-2} \text{ ч} (36 \text{ с})$ при безразмерной частоте: $1 > f \geq 0,3$. Средние вертикальные движения отсутствуют, при наличии сдвига ветра наблюдаются пульсации скорости, т. е. движение турбулентно. Турбулентные пульсации температуры выражены очень слабо и в самой высокочастотной части спектра. Такое состояние рассматривается как невозмущенное или равновесное, а всякое отклонение от этого состояния — как возмущение. К равновесному состоянию стремится вернуться возмущенное под действием компенсаторных факторов (обратной связи). При этом состоянии вертикальные профили метеовеличин описываются логарифмическими зависимостями [6], а рефракция радиоволн близка к нормальной. Контекстными признаками этого состояния является отсутствие солнечной радиации (сплошная низкая облачность), скорость ветра у поверхности земли порядка $7 \div 9 \text{ м/с}$, равенство средних значений температуры на уровнях 0,5 и 5 м. На рис. 4 приведен пример эхограммы, полученной автором при таком состоянии АПС.

Обратное рассеяние акустических волн на пульсациях скорости, как известно, отсутствует, но пульсации температуры в данном случае все же не равны нулю. Поэтому амплитудно-временная запись акустического эхо-сигнала в общем имеет шумоподобную структуру, но для ее регистрации требуется повышенная мощность излучения. Горизонтальное сечение эхограммы на каждом фиксированном уровне высоты может рассматриваться как квазистационарный случайный процесс на интервалах 10 мин. Поскольку пространственный масштаб пульсаций температуры увеличивается по мере увеличения высоты, среднее и среднеквадратичное значения эхо-сигнала уменьшаются с увеличением высоты. Прерывистые горизонтальные линии на записи рис. 4 являются следствием отражения акустических сигналов от балконов высотной метеорологической башни, на территории которой производились наблюдения. Информативными признаками структуры эхо-сигналов при таком термодинамическом состоянии являются профиль эхо-сигнала и профиль его среднеквадратичного отклонения, полученные на временном интервале порядка 10 мин.

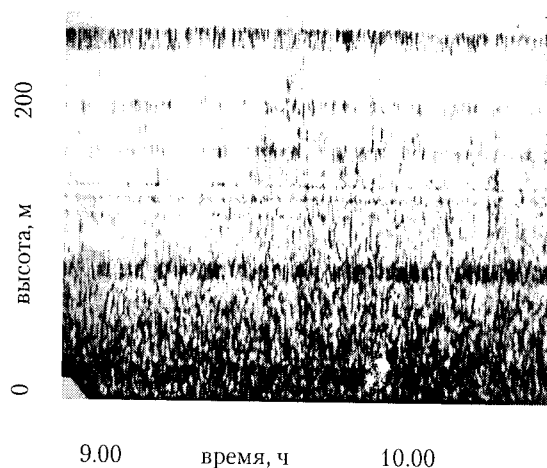


Рис. 4

Б. Термическая конвекция. При развитой тепловой конвекции наблюдается горизонтальный сдвиг вертикальной скорости ветра в области вертикального раздела между восходящим и нисходящим потоками. Вертикальная скорость движения в этой области, очевидно, близка к нулю. При этом температура нисходящего и восходящего потоков значительно различается, вследствие чего в этой области генерируются интенсивные пульсации температуры, вызванные турбулентным перемешиванием. Следовательно, именно эти области являются источником наиболее интенсивного рассеяния энергии акустической волны. Конвективный элемент, или термик, представляет собой некоторую однородную воздушную массу размером порядка высоты зондируемого слоя, температура которой выше окружающего воздуха. Поэтому собственно объем конвективного элемента не может создавать эхосигнал, его продуцируют области, образующие границу раздела между средой и конвективным элементом.

Горизонтальные размеры таких областей составляют по разным данным $600 \div 2000$ м и зависят от метеоусловий. Однако наши знания о фактической конфигурации конвективных элементов далеки от удовлетворительного состояния. Движение в нисходящих потоках близко к ламинарному, эти области имеют только вертикальные границы, поэтому эхо-сигналы этими областями не создаются. Эхограммы, полученные при таком термодинамическом состоянии, имеют типичную структуру вертикальных струй, однако, как было показано выше, области наиболее мощного сигнала соответствуют нулевым вертикальным движениям. Поэтому анализ доплеровских сдвигов частоты эхо-сигнала при данном состоянии не эффективен, так как собственно измерения в этом случае должны проводиться при малых или нулевых сигналах. Пример эхограммы, полученной автором при таком состоянии АПС, приведен на рис. 5. Вертикальный сдвиг ветра в этом случае имеет значительную величину только в приповерхностном слое высотой порядка нескольких метров и легко контролируется контактными измерениями. Единственной причиной его возникновения является трение основного потока о поверхность земли. Поэтому измерения вертикальных профилей скорости ветра в этом случае не имеют практического значения и, следовательно, наклонное зондирование в данном случае также теряет смысл. При таком термодинамическом состоянии интерес представляет обнаружение и прогнозирование нисходящих потоков со скоростью $w_g \leq 10$ м/с, поскольку эти явления представляют опасность при посадке самолетов, однако они наблюдаются редко. Кроме того, при таком состоянии наблюдается отток влаги от поверхности земли в более высокие слои атмосферы, что создает условия субрефракции радиоволн. Так что определение высоты слоя, в пределах которого упругость водяного пара увеличивается с высотой, и мониторинг этого параметра имеют большое практическое значение.

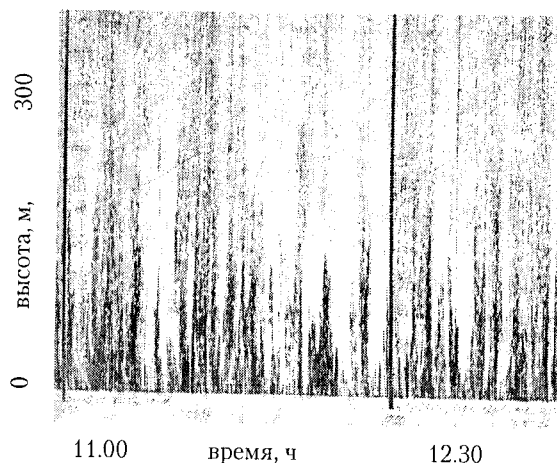


Рис. 5

В. Статически устойчивые состояния. Такое состояние может возникнуть при интенсивном выхола-

живании приземного слоя в ночное время. Вертикальные сдвиги горизонтальной скорости ветра в слое высотой более 10 м могут возникать только в том случае, если в этом слое существует сила сопротивления основному потоку. В этом случае энергия основного потока расходуется на генерацию турбулентного движения, которое перемещает более холодные массы воздуха из нижних слоев в более высокие, а более теплые — на нижерасположенные уровни высоты, совершая при этом работу против сил плавучести. Такой процесс перемешивания может поддерживаться только при непрерывном выхолаживании, что создает инверсию потенциальной температуры и вертикальный градиент скорости в приземном слое. Возникающие при этом мелкомасштабные пульсации температуры создают интенсивные эхо-сигналы во всей толщине слоя инверсии температуры. Поскольку такие слои устойчиво стратифицированы, в них возникают собственные колебания массы в вертикальной плоскости. Они, очевидно, инициируются низкочастотными пульсациями горизонтальной скорости основного потока или порывами ветра. Период этих колебаний, называемых гравитационными волнами или волнами плавучести, или волнами Вайсяля–Брента, определяется высотой слоя инверсии, градиентом потенциальной температуры и ускорением силы тяжести:

$$N_{\text{пл}}^2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}, \quad (5)$$

где g — ускорение силы тяжести; θ — потенциальная температура; z — высота над поверхностью Земли, м.

Типичные значения $N_{\text{пл}}$ составляют $0,17 \times 10^{-2}$ [1/с] для АПС.

Эти волны могут быть обнаружены в поле атмосферного давления, однако высоту слоя, в котором они генерируются, таким способом определить невозможно. При обнаружении эхо-сигнала, временная структура которого имеет вид статистически однородной области, в приземном слое с флуктуирующей верхней границей можно утверждать, что в этом слое атмосферы существует значительный сдвиг ветра и сверхадиабатическое изменение температуры с высотой. Пример структуры эхо-сигналов, полученных автором при таком термодинамическом состоянии АПС, приведен на рис. 6. Для получения количественных оценок сдвига ветра в этой ситуации принципиально может быть использовано измерение доплеровских сдвигов несущей частоты эхо-сигнала при наклонном АЗ. Однако распределенный характер цели вносит в эту процедуру ошибки, величину которых невозможно оценить. В то же время, если известна высота слоя и период гравитационных волн, то в соответствии с (5) может быть восстановлен профиль потенциальной температуры, а следовательно и сдвиг ветра, так как при этом состоянии сдвиг ветра пропорционален градиенту потенциальной температуры.

При этом состоянии создаются условия, способствующие увеличению влагосодержания атмосферы в

пределах инверсионного слоя, поскольку ее вертикальный отток подавлен устойчивой стратификацией. Как следствие, выше устойчивого слоя влагосодержание резко падает, что создает сверхкритические градиенты коэффициента преломления, то есть создаются условия волноводного распространения радиоволн в слое инверсии температуры.

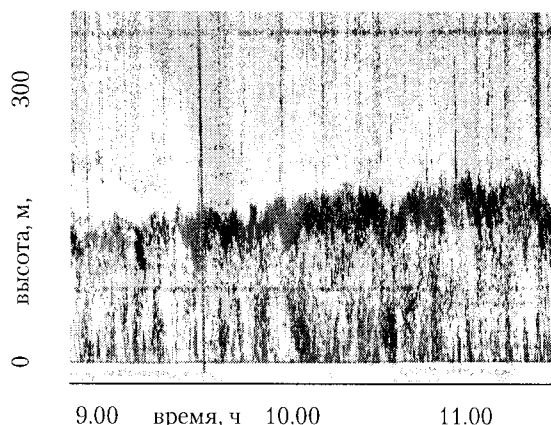


Рис. 6

Мы видим, что различие рассмотренных состояний АПС имеет большое практическое значение, а классификация структур эхо-сигналов АЗ по типам термодинамических состояний позволяет выбирать правила обработки сигналов и методику зондирования АПС в соответствии с типом его текущего термодинамического состояния.

3. ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ РАЗ И АЗ

Цель комплексного использования систем РАЗ и АЗ состоит в оптимизации процедуры синтеза профиля температуры из данных, получаемых синхронно этими системами. В этой комплексной системе результаты АЗ используются для улучшения качества массивов данных, получаемых системами РАЗ путем использования алгоритма их селекции по признаку интенсивности турбулентных процессов, оценка которой производится на основе анализа амплитудно-временной структуры акустических эхо-сигналов. Алгоритм селекции определяется типом термодинамического состояния (ТДС) и включает процедуру его распознавания путем анализа данных АЗ.

При *вынужденной конвекции* точность измерения профилей температуры системой РАЗ определяется только характеристиками системы — мощностью радио- и акустического излучения, точностью измерения частоты эхо-сигнала и т. п. В этом случае роль АЗ состоит только в идентификации такого состояния.

При *свободной конвекции* система акустического зондирования, помимо идентификации собственно факта возникновения этого состояния, дает возможность исключить измерения на тех интервалах времени, когда в зоне установки систем наблюдается промежуточная область между восходящими и нисходящими

ми движениями, и принять к анализу области восходящих и нисходящих движений или невозмущенных областей. Идентификация этих составляющих процесса может быть легко осуществлена по разности абсолютных значений температуры, полученной системой РАЗ в нисходящих движениях и термиках. Это позволяет рассчитать силу плавучести и оценить высоту проникновения конвективных элементов в АПС. В данном случае конвективный элемент следует рассматривать как возмущение на фоне некоторого установившегося профиля температуры. Это дает возможность для данного состояния АПС оценить высоту слоя с пониженным влагосодержанием и, следовательно, построить модели распределения коэффициента преломления радиоволн и процессов распространения вредных выбросов различного состава, а также оценить вероятность возникновения мощных нисходящих потоков, представляющих собой опасность для самолетов при совершении посадки.

При развитии приземных инверсий АЗ дает верхнюю границу турбулентного слоя с учетом амплитуды (и периода) гравитационных волн. Получение этих параметров системой РАЗ при ее самостоятельном использовании оказывается проблематичным, поскольку корреляционная связь между вертикальными профилями «мгновенных» значений температуры в исследуемом слое высотой порядка 600 м, полученными с интервалом времени 2 с, практически отсутствует. Это обстоятельство является следствием присутствия в АПС при таком термодинамическом состоянии случайных турбулентных пульсаций температуры с частотой выше 1 Гц и амплитудой больше 0,05 °С, что подтверждается, например, данными работы [4]. В этом случае обеспечение выполнения условия (1) во всем слое инверсии температуры с помощью наиболее эффективного метода – априорного синтеза функции управления частотой в радиоканале системы РАЗ [2] и дальнейшее его уточнение методом последовательных приближений по критерию минимума разности: $|\Delta f_e - f_s| = \min$, где Δf_e – доплеровский сдвиг частоты принятого радиосигнала, f_s – частота акустического сигнала, оказывается неэффективным. Однако в этом случае имеется возможность проводить измерения абсолютных значений температуры системой РАЗ непосредственно над турбулентным слоем, что дает средний градиент температуры в слое инверсии, так как температура в приповерхностном слое АПС может быть легко получена путем непрерывных наблюдений с помощью контактных датчиков. Возможность мониторинга этой величины позволит разработать эффективные модели устойчивых состояний, статистика которых в настоящее время практически не исследована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ возможностей комплексных систем РАЗ и АЗ показывает, что аналогом этих систем по исследованию АПС могут быть только метеобашни высотой порядка 600 м. Однако их создание и эксплуатация

связаны с большими техническими сложностями и требуют больших финансовых затрат. Поэтому они не находят широкого применения в практике метеорологических наблюдений.

В рассмотренной комплексной системе система АЗ выполняет функцию распознавания типа текущего термодинамического состояния АПС. Результат такой процедуры всегда содержит долю неопределенности. Роль системы РАЗ состоит в устранении этого недостатка путем измерения абсолютных значений профиля температуры.

Собственно возможность распознавания типов ТДС в комплексных системах РАЗ-АЗ уже дает оценки профилей метеовеличин, которые могут быть получены как результат применения моделей идентифицированных состояний АПС. Для некоторых практических задач, например, при выборе адекватной модели распространения вредных выбросов, эти данные могут использоваться самостоятельно. Однако в других случаях, когда, требуются более точные оценки, необходимы измерения абсолютных значений профиля температуры.

Система АЗ может быть акустическим каналом системы РАЗ. Однако с целью обеспечения возможности отдельного управления параметрами систем при различных термодинамических состояниях АПС целесообразно использовать ее как отдельную составную часть комплексной системы РАЗ-АЗ.

В данной работе осталась не рассмотренной эффективность исследования адвективных процессов с помощью комплексной системы зондирования. Относительно этого можно сказать, что, поскольку адвективные процессы по сравнению с рассмотренными состояниями характеризуются более выраженной изменчивостью и нестационарностью, роль мониторинга АПС системой АЗ в комплексной системе только возрастает.

Литература: 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985. – 197 с. 2. *Горелик А.Г., Жежерин В.Р., Каллистратова М.А. и др.* Радиоакустическое зондирование атмосферного пограничного слоя с автоподстройкой частоты // Метеорологические исследования. – 1987. – № 28. – С. 82–92. 3. *Иванов В.Н., Орданович А.Е., Петрова Л.И.* Некоторые особенности спектров скорости ветра и температуры в низкочастотном диапазоне при конвекции // Физика атмосферы и океана. Том IX. – 1973. – № 8. – С. 787–800. 4. *Макаллистер Л.Г., Махони А.Р., Поллард Д.Р., Шоу П.Д.Р.* Акустическое зондирование – новый метод исследования строения атмосферы. // Тр. ИИЭР – 1968. – № 4. – С. 231–240. 5. *Мигем Ж.В.* Энергетика атмосферы / Под ред. Л.Т. Матвеева. – Л.: Гидрометиздат, 1977. – 328 с. 6. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 640 с.



Поступила в редколлегию 17.09.2004

Леонидов Владимир Иванович, зав. ПНИЛ, ХНУРЭ. Область научных интересов: автоматизация анализа электрических сигналов методами распознавания образов в экологии и медицине.