

АВТОМАТИЗАЦИЯ КЛАССИФИКАЦИИ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР ЭХО-СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

В современных системах акустического зондирования (АЗ) атмосферного пограничного слоя (АПС) конечным результатом обработки эхо-сигналов является восстановление некоторых параметров АПС по измерениям параметров одиночного эхо-сигнала на временном интервале t_a , равном длительности зондирующего импульса τ_n , т.е. $t_a = \tau_n$ [1 – 3]. Такой подход ограничивает число восстанавливаемых производных параметров эхо-сигналов измерением импульсной мощности $P_n(\sigma)$, которая интерпретируется как коэффициенты структурной функции турбулентного поля температуры C_T^2 и скорости C_V^2 , и спектром $W(\omega)$, сдвиг центральной частоты которого относительно центральной частоты зондирующего сигнала интерпретируется как радиальная скорость V_R движения воздушной массы, ограниченной импульсным объемом [2]. Однако турбулентный и нестационарный характер процессов притока и преобразования тепловой энергии в АПС [4, 5], распределенный характер цели, в качестве которой выступает воздушная масса, заключенная в импульсном объеме, а также неконтролируемое воздействие внешних акустических помех приводят как к неопределенностям при расчете параметров эхо-сигналов, так и к неопределенности их интерпретирования. Для того чтобы избежать этого недостатка, а также с целью расширения функциональных возможностей метода АЗ и с целью получения данных прогностического характера, целесообразно исследовать не только одиночные эхо-сигналы, но и временные характеристики их выборок, представленных, например, в виде амплитудно-временных записей (эхограмм) [1].

Анализ эхограмм

Проведенный авторами систематический визуальный анализ эхограмм показывает, что записи, получаемые в непрерывном режиме, характеризуются большой изменчивостью. На рис.1 приведен пример непрерывной записи полученной авторами 18.09.94 г с помощью бистатической импульсной системы акустического зондирования, работавшей на территории Харьковского аэропорта в период с 15 августа по 30 октября 1994 г. Запись показывает эволюцию в термодинамическом состоянии (ТДС) от радиационной инверсии температуры, наблюдавшейся (на записи) от 8.45 до 10.30 местного времени, до развитой термической конвекции от 11.00 до 12.30. Скорость ветра в приземном слое не превышала 1,3 м/с при постоянном северном направлении. Температура воздуха, измеренная на высоте 2 м, изменялась от 19,2°C в 8.40 до 26,2°C в 12.30. Запись отображает типичный процесс изменения ТДС в зависимости от режима солнечной радиации (времени суток), наблюдающийся летом или ранней осенью в условиях антициклона. Процессы такого типа можно считать детерминированными. Однако их наблюдение и идентификация имеет большое практическое значение, так как позволяет, во-первых, применить как минимум три различных типа моделей АПС, во-вторых, определить интервалы времени их справедливости для текущего состояния АПС и в-третьих, получить пространственную область определения применяемых моделей. В данном случае с помощью адекватных моделей могут быть описаны процессы распространения вредных выбросов, сдвиги вертикальной и горизонтальной компонент скорости ветра, а также их средние вертикальные профили.

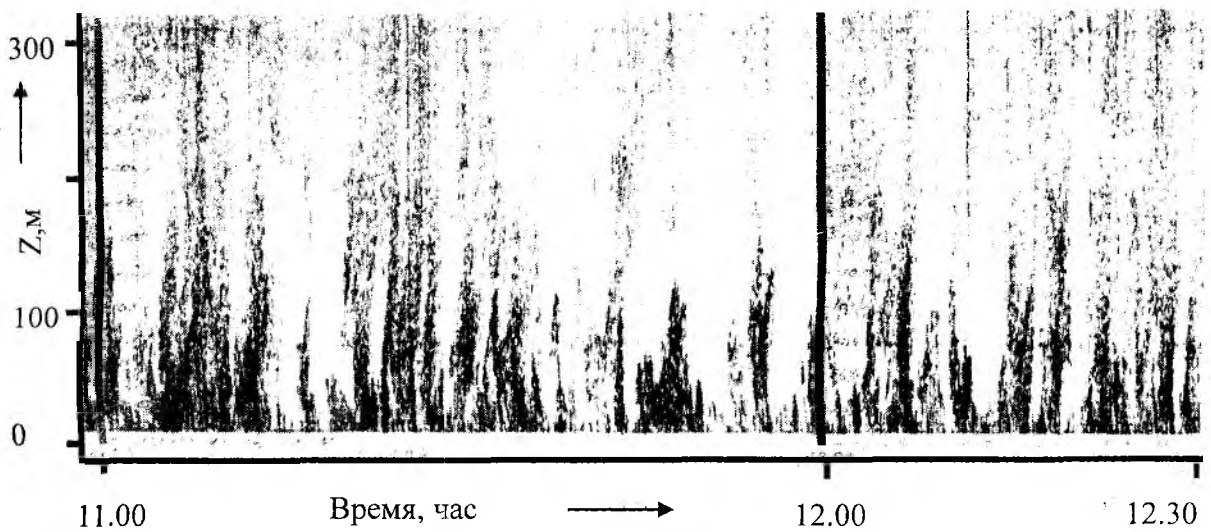
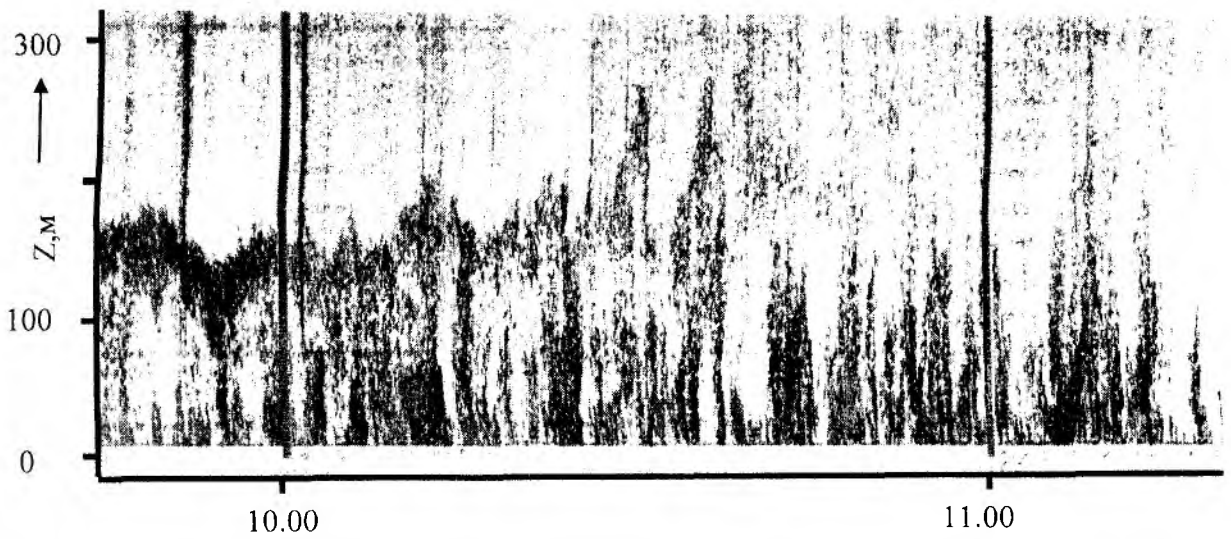
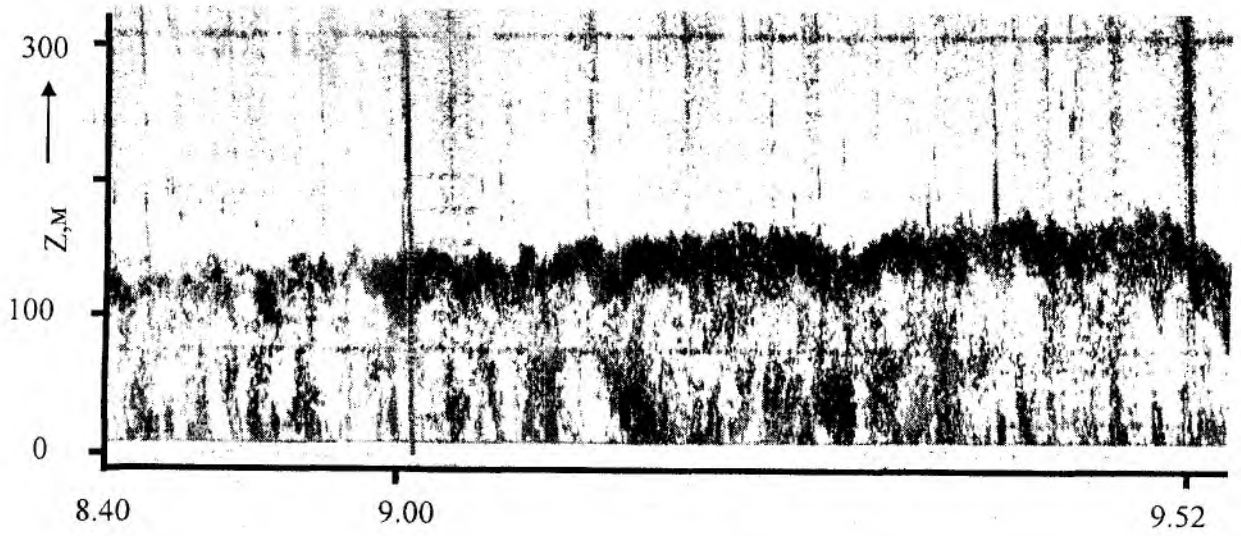


Рис. 1

Изменчивость эхограмм характерна также и для однотипных погодных ситуаций, описанных по данным аэрологического зондирования. Это может означать, что подавляющее большинство изменений в ТДС АПС некоторым образом отображается на амплитудно-временной структуре эхо-сигнала. Это свойство метода АЗ побуждает к попыткам решить обратную задачу – по анализу структуры эхограммы описать ТДС в такой системе признаков, которая позволяла бы в конечном счете перейти к распределениям физических величин. Мы предполагаем, что если вид эхограммы зависит от состояния атмосферы, определенного в некоторой системе признаков, то должно быть справедливым утверждение о том, что из стационарности параметров эхограммы следует стационарность состояния АПС на тех же пространственно-временных масштабах, на которых произведен анализ эхограммы. Если это так, то состояния АПС на этих интервалах могут быть описаны квазистационарными моделями распределения физических величин или иных свойств АПС, выраженных в терминах математического формализма. Достоинством такого подхода является перенос процедуры измерения параметров V_R , C_T^2 и C_V^2 в область синтеза моделей ТДС, совокупность которых может представлять собой библиотеку готовых решений, в структуре которой будет реализован перечень разновидностей ТДС.

В настоящей работе рассматриваются цифровые аналоги эхограмм, которые формируются в памяти компьютера. Результатом однократного вертикального зондирования атмосферы импульсным сигналом длительностью $\tau_{\text{и}}$ является реализация эхо-сигнала $S = U_r(t)$ длительностью $t_p = T_F - t_b$, где T_F – период повторения зондирующих импульсов, t_b – время блокировки приемного тракта. С выхода приемного тракта огибающая амплитуды эхо-сигнала преобразуется в последовательность цифровых отсчетов, производимых с интервалом $\Delta t = \tau_{\text{и}}$. Таким образом, максимальное количество дискретных отсчетов каждой реализации составит $j_{\text{max}} = T_F / \tau_{\text{и}}$. При этом разрешающая способность по дальности, как известно, равна: $\Delta z = C_{\text{зв}} \cdot \tau_{\text{и}} / 2$, а максимальная высота зондирования $z_{\text{max}} = C_{\text{зв}} \cdot T_F / 2$. В результате процедуры зондирования получаем массив данных, содержащий i реализаций, которые организуются в матрицу-выборку M_{ij} , где элементами столбца j являются одноименные дискретные отсчеты реализаций, а элементы строк образуют одномерные массивы значений эхо-сигналов для j -й высоты. Свойства полученного фрагмента в виде матрицы-выборки (МВ) рассматриваются как объект исследования.

Классификация выборок эхо-сигналов

Значительные формальные различия эхограмм, которые наблюдаются при однотипных состояниях, объясняются тем, что на ТДС и, следовательно, на структуру эхо-сигналов, влияют причины случайного характера. К ним можно отнести, например, неоднородность земной поверхности, различие в теплофизических, радиационных и других свойствах ее соседних частей, бризы, горно-долинные (склоновые) и ледниковые ветры. В результате в общем случае нелинейного воздействия этих факторов на основной воздушный поток синоптического масштаба, создаются процессы и движения мезометеорологического масштаба горизонтальные размеры которых изменяются от нескольких сотен метров до одной или двух сотен километров [6-7].

На основании выше изложенного можно сделать вывод о том, что при анализе результатов АЗ возможное разнообразие исследуемых объектов (МВ) значительно превосходит число моделей АПС, из которых следует выбрать одну, адекватную его текущему состоянию. Следовательно, задача анализа МВ относится к классификационным, решение которой может быть получено методами распознавания образов.

При разработке систем автоматического распознавания возникают задачи представления исходных данных в виде вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i – результаты измерений, задача выделения характерных признаков или свойств из полученных исходных данных, задача снижения размерности вектора образов (предварительная обработка и выбор признаков), а

также отыскание оптимальных решающих процедур, необходимых для идентификации и классификации [8]. В данном случае основная трудность решения задачи классификации состоит в выборе системы признаков формирования классов МВ. В общем случае существуют два принципа решения этой задачи – выявление математических признаков и выявление таких особенностей в классифицируемых образах, которые связаны с причинами, приводящими к изменениям в этих образах. Первый подход выглядит абстрактным. Для его реализации необходимо исследовать представительную выборку, которая содержала бы все возможные вариации собственно образов. Такой подход оправдан, когда целью классификации является задача систематизации данных. В случае классификации МВ конечной целью является классификация ТДС АПС. Поэтому в данном случае второй подход следует считать предпочтительным. Для его реализации необходимо проанализировать физические основы возникновения эхо-сигналов.

Согласно теории рассеяния звуковых волн в турбулентной атмосфере [4, 9, 10], развитой также и в экспериментальных исследованиях [11, 12], выражение для величины удельной мощности обратного рассеяния σ из импульсного объема имеет вид:

$$\sigma = 2\pi k^4 \frac{\Phi_T(2k)}{4T^2}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda_{зв}$, $\lambda_{зв}$ – длина волны звука; T – среднее значение температуры в рассеивающем объеме; Φ_T – трехмерная спектральная плотность турбулентных пульсаций поля температуры при пространственном волновом числе K , где $K = 2k$ или $K = 2\pi/l$, где $l = \lambda_{зв}/2$ – пространственный масштаб турбулентных пульсаций температуры.

Фактически выражение (1) представляет собой попытку представить импульсный объем в виде некоторого эквивалента эффективной площади (сечения рассеяния). При этом из чисто геометрических соображений принимается, что наиболее эффективное рассеяние происходит на пульсациях температуры, пространственный масштаб l которых равен: $l = \lambda_{зв}/2$. Относительно этого предположения известно [12], что возникновение эхо-сигналов, например, при длине звуковой волны $\lambda_{зв} \sim 0,35$ м, сопровождается заметными флуктуациями температуры масштаба $l \sim 0,2$ м в рассеивающем объеме. Там же указывается, что в общем случае различимые эхо-сигналы возникают всякий раз, когда в атмосфере присутствуют пульсации температуры с частотой выше 1 Гц и амплитудой больше $0,05^\circ\text{C}$. Сведения относительно вероятности возникновения температурных пульсаций в виде пространственных решеток с шагом $l = \lambda_{зв}/2$ в литературе отсутствуют, однако можно предположить, что при вертикальном зондировании вследствие расслоенности потока по вертикали вероятность таких структур весьма мала.

Поскольку выражение (1) формализует эффект рассеяния, создаваемый трехмерной спектральной плотностью поля температурных пульсаций $\Phi_T(K)$, значения величины σ будут усреднены на том же временном интервале, что и $\Phi_T(K)$, т.е. на интервале $t_{cp} \geq 10$ мин [6].

Если предположить, что турбулентное поле температуры стационарно в пространстве и времени, то $\Phi_T(K)$ может быть выражено через параметр соответствующей структурной функции [4]:

$$\Phi_T(K) = 0,033 C_T^2 K^{-11/3}, \quad k_0 < K < k_m, \quad (2)$$

где C_T^2 – коэффициент структурной функции турбулентного поля температуры, определяемой как $D_T(r) = C_T^2 r^{2/3}$ при $L_0 > r > l_m$, где L_0 и l_m – внешний и минимальный масштаб турбулентности соответственно.

Или, из (1) и (2):

$$\sigma = 0,008\lambda^{-1/3} \left(C_T / T \right)^2. \quad (3)$$

По определению структурной функции параметр C_T^2 есть средний квадрат разности температур в точках пространства, разнесенных на единичное расстояние, т.е. это статистический момент поля температуры.

Выражение (3) указывает на весьма слабую зависимость мощности рассеяния от длины акустической волны. Так как согласно экспериментальным данным [1-3, 11-15] эхо-сигналы при однотипных ТДС, например, при термической конвекции, наблюдаются в широком диапазоне акустических длин волн, это эквивалентно предположению о том, что на заданной высоте одновременно присутствуют пульсации всех масштабов в диапазоне всех практически используемых длин волн, например от 0,4 м до 0,11 м, и что плотность их распределения близка к равномерной.

Рассмотренные количественные оценки процесса обратного рассеяния акустической мощности при АЗ АПС позволяют интерпретировать только среднюю за 10 мин мощность эхо-сигнала как величину, пропорциональную спектральной плотности температурных пульсаций масштаба $\lambda_{зв}/2$ или среднему квадрату разности этих пульсаций в точках, расстояние между которыми определяется выбранной системой измерений, например 1 см. Практическое использование такого интерпретирования имеет весьма ограниченный характер. Например, параметр C_T^2 может быть использован для оценки аналогичного параметра C_n^2 коэффициента преломления для электромагнитных волн видимого диапазона частот [5].

Анализ современного представления о физических причинах возникновения эхо-сигналов приводит к выводу о том, что обратное рассеяние создается случайными пульсациями температуры, которые возникают в результате процессов турбулентного обмена объемами воздуха между слоями с различной потенциальной температурой. Следовательно, для возникновения эхо-сигнала необходимы во-первых, статическая температурная расслоенность и, во-вторых, необходим сдвиг ветра, создающий турбулентные пульсации скорости, приводящие к турбулентному перемешиванию. Отсюда следует, что мощность принятого эхо-сигнала характеризует разность температур в перемешиваемых слоях атмосферы, а его пространственная структура (на МВ) характеризует величину сдвига ветра в горизонтальном и вертикальном направлениях – чем шире зона эхо-сигнала, тем больше сдвиг ветра, т.е. тем глубже взаимное проникновение вихрей, переносящих различные свойства, в данном случае температуру. Однако к количественному описанию мощности эхосигналов следует отнестись только как к оценочному, так как их вывод базируется не на бесспорных гипотезах. Следовательно, задачами классификации МВ могут быть ответы на следующие вопросы: в каком направлении происходит перемешивание – в горизонтальном или вертикальном, происходит ли оно вообще, какова локализация областей, в которых происходит перемешивание, происходит ли перемешивание при детерминированном типе ТДС (развитая термическая или вынужденная конвекция, радиационная инверсия температуры) или это нестационарный процесс (адвекция). Решение перечисленных задач и предлагается осуществить путем классификации МВ.

Структура процедуры автоматизированной классификации эхо-сигналов

Обобщенная структура использования АЗ в метеорологическом мониторинге может быть представлена в следующем виде. Эхо-сигналы вертикального импульсного АЗ после прохождения приемного тракта детектируются, преобразуются в цифровую форму и комплектуются в виде матриц-выборок (МВ) M_{ij} , содержащих i последовательно полученных временных зависимостей (вертикальных профилей). Объем каждой МВ соответствует получасовому непрерывному зондированию АПС. Эти МВ рассматриваются

как образы, которые могут быть отнесены к одному из классов, сформированных по рассмотренным выше принципам. Для каждого класса образов априори, на стадии «обучения» системы распознавания разрабатываются совокупности моделей признаков, которые представляют собой параметры и функции некоторого универсального вида. Признаки отражают особенности структуры МВ, обусловленные термодинамическим состоянием АПС, которое описывается данным классом. В результате зондирования АПС формируются МВ по которым рассчитываются параметры и признаки в соответствии со стандартным для всех классов перечнем. Полученные признаки далее приводятся к некоторому универсальному временному и амплитудному формату, в котором разработаны соответствующие модели. Процедура распознавания сводится к последовательному сравнению полученных признаков с их моделями, хранящимися в памяти ЭВМ. В результате процедуры сравнения рассчитываются среднеквадратичные отклонения σ_i между признаками и их моделями для данного класса образов. Полученные значения σ_i анализируются и рассматриваются как мера соответствия признаков данному классу. В результате получаем описание соответствия полученной МВ данному классу в выбранной системе признаков и с известной точностью, которая оценивается в соответствии с

известным выражением: $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$, где n – количество классов. Процедура сравнения повторяется для всего перечня классов. Рассматриваемая МВ относится к тому классу, для которого $\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\Sigma \min}$.

Для того чтобы процедура сравнения была компактной, ее последовательность и перечень операций определяются гипотезой относительно текущего класса ТДС, которая выдвигается на основании непрерывного анализа контекстной информации.

На рис. 2 приведена блок-схема рассмотренного обобщенного алгоритма процедуры автоматизированной классификации структур акустических эхо-сигналов.

Заключение

Формализация структурного анализа выборок эхосигналов позволяет применить новый подход к использованию АЗ для исследований АПС. Этот подход состоит в автоматизированной классификации пространственно-временных структур эхо-сигналов по принципу их соответствия известным типам термодинамических состояний АПС и последующем применении моделей распределения метеопараметров или иных показателей состояния АПС. Такой подход, например, дает возможность указать границы применимости известных логарифмических моделей АПС, разработанных для приземного и пограничного слоя и справедливых, как известно только для тех состояний, когда вертикальный градиент изменения температуры не слишком отличается от сухоадиабатического, а также позволяет упростить методику расчета потоков тепла при использовании моделей, разработанных на основе теории подобия и размерности. Классификация выборок на основе структурного анализа также стимулирует исследователей, работающих в области изучения термодинамики атмосферы, к разработке моделей возмущенных состояний АПС, например для сильной неустойчивости и для развитых температурных инверсий, для которых модели вертикальных профилей физических величин в настоящее время просто отсутствуют, а также для наиболее нестационарных и наименее изученных состояний, связанных с адвективными процессами, при моделировании процессов мезометеорологического масштаба, которые являются определяющими для целого ряда важных практических приложений, таких как моделирование процессов рассеивания вредных выбросов, диагностики условий распространения радиоволн и условий посадки самолетов. Основным достоинством такого подхода является перенос процедуры решения обратной задачи из области измерения параметров эхосигналов в область синтеза моделей АПС, классификация которых осуществляется на основании автоматизированного анализа амплитудно-временной структуры акустических эхо-сигналов.

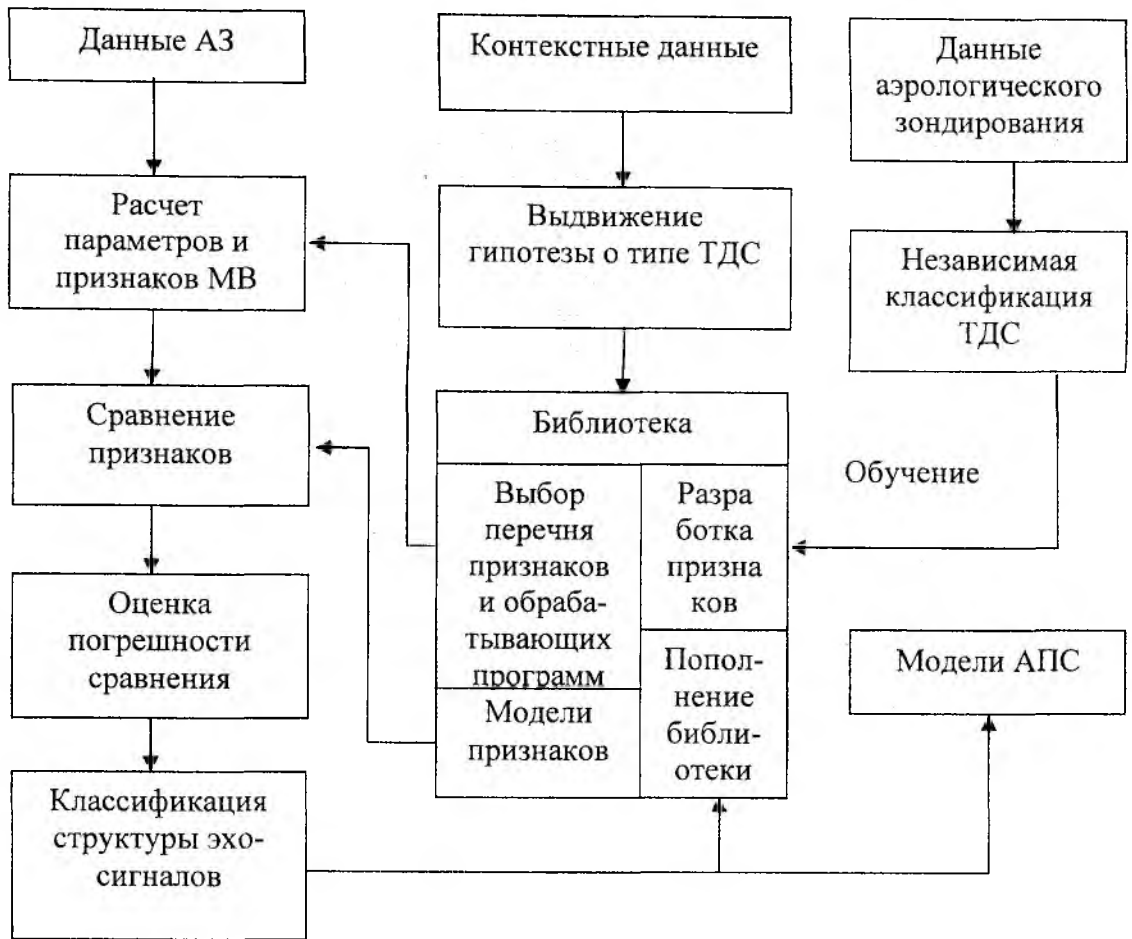


Рис. 2

Список литературы: 1. *Каллистратова М.А., Карюкин Г.А.* Исследование вертикальной структуры флуктуаций показателя преломления методом акустического зондирования. Астроклимат и эффект. телескопов // Тр. Всес. конф. РГ Астроклимат астросовета АН СССР, Абастумани, 23 – 26 ноября 1981 Вып. 6. 2. *D.W. Beran, C.G. Little and B.C. Willmarth.* Acoustic Doppler Measurements of Vertical Velocities in the Atmosphere. Nature, Vol. 230, March, 19. 1971. P.160 – 162. 3. *R.L. Coulter,* «Remote sensing of micrometeorological quantities». Proceedings of the 11th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the atmosphere and Oceans. 24-28 June 2002, Rome, Italy, P. 321 – 327. 4. *Обухов А.М.* Рассеяние звука в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30, № 7. С. 611 – 614. 5. *Иванов В.Н., Масагутов Т.Ф.* Флуктуации оптических неоднородностей в турбулентной атмосфере // Тр. ин-та экспериментальной метеорологии. Обнинск, 1974, Вып. 6 (44). С. 135 – 145. 6. *Л.Т. Матвеев,* Курс общей метеорологии: Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1976. 640 с. 7. *Ж.В. Мигем,* Энергетика атмосферы / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометиздат, 1977. 328 с. 8. *Дж. Ту, Р. Гонсалес.* Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1979. 9. *Д.И. Блохинцев.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. С. 206. 10. *А.С. Монин, А.М. Яглом.* Статистическая гидромеханика. Ч.2. М.: Наука, 1967. 11. *Каллистратова М.А.* Экспериментальное исследование распространения звука в турбулентной атмосфере // Докл. АН СССР. 1959. Т. 125, № 1. С. 69 – 72. 12. *Акустическое зондирование – новый метод исследования строения атмосферы / Л.Д. Макаллистер, Д.Р. Поллард, А.Л. Махони, П.Д.Р. Шоу // ТИИЭР. 1968. №4. С. 231 – 239.* 13. *G.H. Clark, E. Charash and E.O. K. Bendun / NTES Pattern Recognition Studies in Acoustic Sounding, Journal of applied meteorology, vol. 16, December 1977., p 1365 – 1368* 14. *Анализ частотно-энергетических соотношений при зондировании атмосферы акустическими видеосигналами / А.Ф.Апорович., Г.И.Сидоров, В.И.Сидько, В.И.Леонидов // Радиотехника. Харьков: Изд-во ХГУ. 1980. Вып. 55. С. 93.* 15. *В.И. Леонидов, Ф.В. Кивва* Прогнозирование вертикальных профилей коэффициента преломления воздуха над океаном по данным дистанционного акустического зондирования // Физические исследования с использованием радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сб. науч. тр. ИРЭ АН Украины. Харьков. 1991. С. 103 – 111.