АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 5, с. 717 - 724

УДК 534

АКУСТИКА В ТУРКМЕНИСТАНЕ

© 1995 г. А. А. Бердыев, В. А. Мухамедов

Физико-технический институт АН Туркменистана
744000 Ашгабат, ул. Гоголя, 15

Поступила в редакцию 25.08.94 г.

Рассматривается становление и развитие акустических исследований в Туркменистане. Анализируются основные достижения последних лет в области акустической спектроскопии жидкостей и геоакустике и перспективы развития акустических исследований.

Акустические исследования в области физики ультразвука были начаты в Физико-техническом институте Академии наук Туркменистана в 1951 г. одним из авторов (А.А. Бердыевым) с привлечением представителей студенческой и научной молодежи, ставших впоследствии известными акустиками (Н.Б. Лежнев, М.Г. Васильева, В.И. Сюзяев и др.).

Большую помощь в постановке задач ультразвуковых исследований жидкостей нам оказал профессор П.А. Бажулин. Это направление бурно развивалось в послевоенные годы. Главными центрами фундаментальных исследований являлись ФИАН им. П.Н. Лебедева (П.А. Бажулин, И.Л. Фабелинский и др.), МГУ им. М.В. Ломоносова (А.А. Предводителев, В.М. Красильников, М.И. Шахпаронов), Ленинградский госуниверситет (И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников), Киевский госуниверситет им. Т. Шевченко (А.З. Голик), Педагогический институт им. Н. Крупской (В.Ф. Ноздрев). Почти все эти ученые в различные годы посещали ФТИ АНТ и оказывали большую теоретическую, методическую и техническую помощь. Помощь и поддержку в развитии акустических исследований нам оказали академики В.Л. Гинзбург, Л.М. Бреховских, профессоры М.А. Исакович и Л.М. Лямшев. Большая дружба и научное сотрудничество связывает нас с акустиками отдела теплофизики АН Узбекистана, возглавляемого академиком П.К. Хабабуллаевым и акустиками ФТИ им. Умарова АН Таджикистана, работающими под руководством академика А.А. Адхамова.

Фундаментальные работы Л.И. Мандельштама, М.А. Леонтовича, Я.И. Френкеля, М.А. Исаковича, Н.О. Кнезера, К.Ф. Герцфельда и др. предоставили экспериментаторам возможность глубокого осмысления полученных результатов и постановки новых исследований жидкого состояния акустическими методами. Проблема жидкого состояния до сих пор имеет исключительно важное значение. Особое место в этих исследованиях отводится тепловым и механическим свойствам, которые проявляются в колебательных и вращательных спектрах, комбинациях колебательного и вращательного движения молекул. При изучении этих свойств жидкости видное место занимают акустические методы. Впервые акустическим методом было экспериментально установлено наличие второго (объемного) коэффициента вязкости (П.А. Бажулин), введенного в гидродинамической теории Стокса. Акустические исследования позволяют определить сжимаемость, частотные зависимости поглощения и скорости звука, непосредственно связанные с молекулярными механизмами жидкого состояния. Все эти достижения акустики малых амплитуд послужили базой для возникновения новой области акустики – молекулярной акустики.

В современной молекулярной акустике особое внимание уделяется исследованиям в области высоких частот, поскольку для многих жидкостей релаксационные эффекты проявляются в диапазоне высоких и сверхвысоких частот порядка 10^8 - 10^{11} Гц. Следует отметить приоритет акустиков Туркменистана в создании техники акустического эксперимента для исследования жидких сред на сверхвысоких частотах с использованием как продольных, так и поперечных волн. Использование метода нерезонансного возбуждения ультразвука пьезоэлектрическими кристаллами проф. К.Н. Баранского позволило нам создать акустические установки для исследования жидкости до частот 3×10^9 Гц. При высоких частотах поглощение звука весьма велико, и, учитывая большие трудности при измерении поглощения и скорости ультразвука, был разработан специальный акустический тракт, в котором в качестве измерителя микроперемещений применено оптико-интерференционное устройство с электронным преобразователем и введена акустическая линия задержки, позволяющая когерентно смешивать радиочастотный и звуковой сигналы для образования интерференционных эффектов при больших затуханиях звуковых волн (Н.Б. Лежнев, В.В. Лапкин).

Одновременно успешно велись работы по созданию аппаратуры и исследованию жидкостей на низких частотах. Комплекс разработанных методов и аппаратуры позволяют исследовать релаксационные явления в жидкостях в широком интервале частот и температур как продольных, так и сдвиговых волн [1 - 6].

Успехи акустиков ФТИ АНТ отмечались на проводимых в г. Ашгабате I Всесоюзной конференции по распространению поперечных волн в жидкости (1974 г.) и IV Всесоюзном симпозиуме по физике акустогидродинамических явлений с секциями молекулярной акустики и геоакустики (1985 г.).

Дальнейшие работы в технике измерений развиваются в области автоматизации акустического эксперимента, повышения точности измерений, разработки новых методов измерения. Признанным авторитетом в этой области является член-корр. АНТ Н.Б. Лежнев. Под его руководством создан ряд новых методик как по акустической, так и оптической спектроскопии жидких сред. Особо следует отметить созданный Н.Б. Лежневым уникальный акустический гиперзвуковой спектрометр 3-сантиметрового диапазона (10 ГГц), позволяющий сравнить результаты прямых акустических измерений в жидкости с оптическими. Создание такого комплекса заставило разработать новые методы юстировки и измерения перемещений акустических трактов.

В сочетании с другими методами физико-химических исследований созданная в ФТИ АНТ экспериментальная база позволила выявить тонкие эффекты при исследовании биологически активных соединений и лекарственных препаратов, причем результаты акустических исследований нашли применение в лечебной медицинской практике (Г.А. Назарова). Однако главной целью создания уникального по своим возможностям экспериментального комплекса акустических и оптических измерений является исследование механизмов молекулярного движения в поверхностноактивных веществах в связи с проблемой повышения нефтеотдачи и доизвлечения нефти из заброшенных пластов (Н.Б. Лежнев, Б. Овлякулиев, У. Эсанов, Т. Бурлаченко).

Следующее традиционное для ФТИ АНТ направление связано с исследованиями вязких жидкостей. При глубоком переохлаждении жидкости, минуя фазовый переход первого рода, переходят в стеклообразное состояние, изучение которого представляет интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения. В этой связи большое значение представляют исследования вязких и сильновязких жидкостей (сдвиговая вязкость возрастает на несколько порядков в узком диапазоне температур). В них наряду с продольными упругими колебаниями могут распространяться и сдвиговые волны. В ФТИ АНТ были исследованы жидкости различных классов в широком интервале температур в диапазоне частот 0.5 - 3000 МГц для продольных и 10 - 2000 МГц для сдвиговых волн: многоатомные спирты, сложные полиэфиры, диановые смолы и смолы растительного происхождения, жирные растительные и эфирные масла и др. (Б. Хемраев, В.А. Лысенко, Б. Халлыев, В.А. Мухамедов, В.А. Мурадов, К. Атаев, В. Троицкий, М.А. Бердыев). Итог этих многолетних исследований подведен в докторской диссертации Б. Хемраева [7]. Параметры распространения продольных и сдвиговых волн в области переохлаждения таких объектов демонстрируют целый комплекс аномальных свойств, не укладывающихся в рамки классических представлений о механизмах молекулярного движения в жидкостях. Большую роль в понимании специфики переохлажденных жидкостей сыграли экспериментальные исследования С.В. Кривохижи и И.Л. Фабелинского и нелокально-диффузионная теория М.А. Исаковича и И.А. Чабан, позволившая объяснить большинство экспериментально наблюдаемых зависимостей.

Особые акустические свойства жидкостей проявляются в области стеклования. В этой области были экспериментально обнаружены новые качественные закономерности как выше ($\omega\tau \gg 1$), так и ниже ($\omega\tau \ll 1$) дисперсионной области ($\omega\tau \sim 1$, τ – время релаксации), выражающиеся в аномальном значении индексов скейлинга акустических параметров [8, 9]. Например, нелокально-диффузионная теория, релаксационная теория, теория Рауза, теория диффузии дефектов, эмпирическая модель Барлоу, Эргинцева и Лэмба в области $\omega\tau \ll 1$ дают следующую асимптотику для поведения действительной $G'(\omega\tau)$ и мнимой $G''(\omega\tau)$ составляющих комплексного динамического сдвигового модуля:

$$G'/G_\infty \sim (\omega\tau)^{\nu_1}, \quad G''/G_\infty \sim (\omega\tau)^{\nu_2}, \qquad (1)$$

где $\nu_1 = 2$, $\nu_2 = 1$ для всех перечисленных теорий. В сложных полиэфирах экспериментальные результаты соответствуют скейлинговым выражениям (1), но с другими индексами: $\nu_1 \approx 1.2 - 1.4$, $\nu_2 \approx 0.5 - 0.7$. Аналогичные аномалии в асимптотическом поведении выявлены и выше дисперсионной области для большинства исследованных объектов как для продольных, так и для сдвиговых релаксационных модулей [8, 9].

Даже с развитием техники эксперимента, с появлением таких методик, как рассеяние медленных нейтронов, пикосекундная спектроскопия и др., акустические исследования продолжают занимать важное место в изучении динамики коллективных процессов в жидкостях. Достигается это не просто расширением частотного диапазона и увеличением точности измерением, но усложнением методики эксперимента, в котором акустические измерения играют роль контролируемого параметра исследуемого объекта.

Например, применение акустических измерений в таких нелинейных методиках исследования структурной релаксации, как скачок давления или температуры, в режимах непрерывного нагрева или охлаждения, позволяет получить информацию не только о монотонно меняющейся действительной части модулей упругости, но и получить новые данные о мнимой части модуля, более чувствительной к структурным изменениям объекта, но недоступные иным методам. Кроме того, это позволяет сравнить результаты исследования структурной и акустической релаксации. Такие эксперименты были проведены для ряда сложных полиэфиров (В.М. Троицкий, А.В. Рудин [10]). Было найдено, что релаксация продольного модуля $M_r'(t)$, рассчитанного по непрерывным измерениям скорости и коэффициента поглощения ультразвука в процессе скачка давления, следует эмпирической зависимости Кольрауша–Вильямса–Ваттса:

$$M_r'(t) \sim \exp(-|t/\tau_{st}|^z)$$

с временем структурной релаксации τ_{st} порядка 10 с, $z = 0.35 - 0.45$. Эти же объекты были исследованы традиционными акустическими методами. Оказалось, что малоамплитудная акустическая релаксация в исследованном диапазоне частот, температур и давлений также подчиняется выражению Кольрауша–Вильямса–Ваттса, с тем же значением индекса z, но с другим временем релаксации $\tau_{ак} \sim 10^{-3}$ с. Причины такого большого различия времен релаксации можно объяснить с помощью теории молекулярных процессов с фрактальным временем.

Используя акустические измерения в сложном эксперименте удалось выявить и другие новые эффекты. Например, исследуя динамические процессы переохлаждения жидкости под давлением, был выявлен эффект барического гистерезиса, указывающий на то, что акустические параметры сильновязкой жидкости, переохлажденной при атмосферном давлении и при давлении порядка 100 - 200 МПа существенно различаются (А.В. Рудин). На рис. 1 показано, что полиэтиленгликоль глутарат, переохлажденный под давлением 150 МПа, после сброса давления имеет значение коэффициента поглощения ультразвука на 25% выше, чем при атмосферном давлении. Эффект температурного гистерезиса обнаружен при исследовании нефти: акустические свойства нефти, полученные в режимах нагрева и охлаждения, значимо различаются (Б. Алланазарова, Б. Хемраев). Такие гистерезисные эффекты, как правило, указывают на наличие сверхмедленных релаксационных процессов (с характерными временами от десятков секунд до нескольких суток), поэтому использование акустических измерений с характерными временами 10^{-6} - 10^{-9} с для исследования

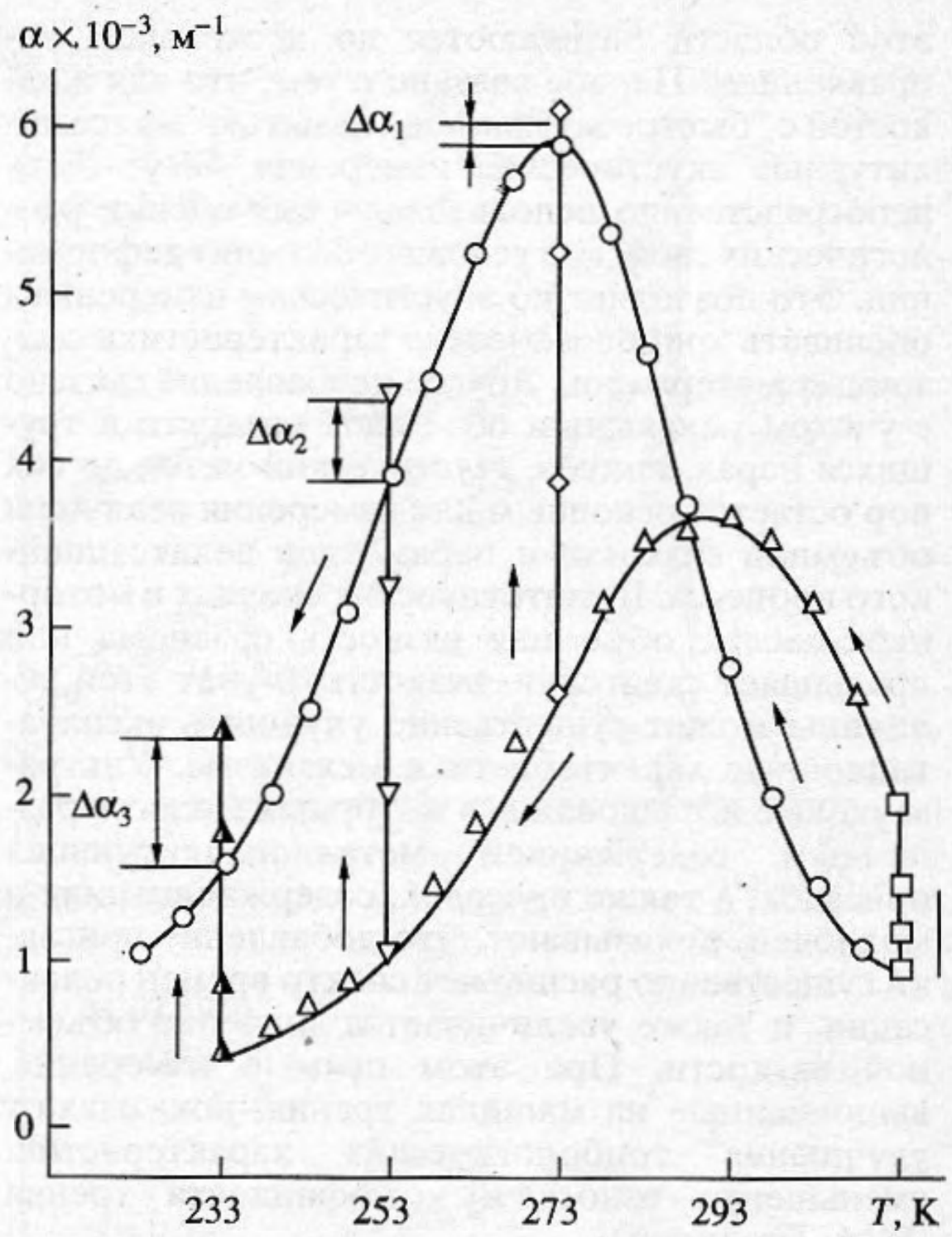

Рис. 1. Температурно-барический гистерезис коэффициента поглощения продольных ультразвуковых волн (f = 27 МГц) в полиэтиленгликоль глутарате при различных режимах изобарического охлаждения (0 – 0.1 МПа, △ – 150 МПа) с последующими режимами изотермического сжатия (□ – 313 К); изотермической разгрузки (◇ – 273 К, ▽ – 253 К, ◭ – 233 К).

таких сверхмедленных процессов представляется перспективным. Нужно отметить, что широкий набор различных экспериментальных методик акустических измерений позволяет фиксировать в сложных объектах тонкие эффекты, недоступные иным методам. Например, результаты акустических измерений в нефти, выполненные по методикам постоянной и переменной акустической базы, существенно различаются (Б. Алланазарова, В.М. Троицкий). Связано это с наличием у нефти предельного напряжения сдвига и процессами разрушения и восстановления парафинового каркаса при изменении акустической базы. Поэтому комплексные акустические исследования нефти в лабораторных условиях позволяют оценить ряд свойств, имеющих важное значение при течении нефти как в нефтепроводах, так и в поровой структуре коллектора.

Акустические исследования жидкостей играют важное значение в проблеме трения и износа. В отделе акустики ФТИ АНТ исследования в

этой области развиваются по нескольким направлениям. Первое связано с тем, что для жидкостей с "быстрозатухающей памятью" малоамплитудные акустические измерения могут быть непосредственно использованы для оценки реологических свойств в условиях больших деформаций. Это позволяет по акустическим измерениям оценивать трибологические характеристики смазочных материалов. Другое направление связано с учетом релаксации объемной вязкости в трущихся парах, причем акустический метод до сих пор остается основным для измерения величины объемной вязкости и параметров релаксационного процесса. В синтетических смазках и моторных маслах объемная вязкость сравнима или превышает сдвиговую вязкость, и учет этой величины может существенно улучшить эксплуатационные характеристики механизма. Ультразвуковые исследования в моторных маслах с различным содержанием металлоплакирующих присадок, а также присадок, содержащих цинк и молибден, показывают, что добавление присадки существенно расширяет спектр времен релаксации, и также увеличивается значение объемной вязкости. При этом прямые измерения, выполненные на машинах трения, показывают улучшение трибологических характеристик: уменьшение износа и коэффициента трения (В.М. Троицкий).

Следующее направление развиваемых в ФТИ АНТ акустических исследований – геоакустика. Упругие волны являются наиболее удобным инструментом изучения структуры и свойств материалов земной коры. В традиционной сейсмологии и сейсморазведке используются длиннопериодные волны, однако для изучения более тонких деталей структуры необходимо использовать более высокие частоты колебаний. Из акустических величин для таких исследований наиболее перспективными являются наблюдения сейсмоакустической эмиссии (САЭ, высокочастотный сейсмический шум) – естественное излучение акустического диапазона, постоянно присутствующее на любом участке земной коры. Помимо сравнительной простоты аппаратуры и методики наблюдений, САЭ имеет ряд других преимуществ. Если параметры распространения упругих волн дают информацию об интегральных характеристиках среды в целом, то параметры САЭ несут информацию о локальных процессах перестройки структуры земной коры и кинетике процесса. Исследование структуры материалов земной коры и процессов их деформирования является важнейшей проблемой для многих отраслей науки и техники – от задач прогноза землетрясений и расчета устойчивости земляных склонов до задач контроля состояния нефте- и газоносных коллекторов при технологических процессах разработки пластов.

Сейсмоакустические исследования в Физико-техническом институте АН Туркменистана были начаты в начале 80-х годов (В.А. Мухамедов, В.А. Мурадов, Б.А. Сеидова). Задача этих исследований состояла в попытке выявить дополнительные оперативные предвестники местных землетрясений по наблюдаемым характеристикам естественного акустического излучения. Первые наши работы в этом направлении основывались на распространенных в то время качественных теориях подготовки землетрясений – теории лавинонеустойчивого трещинообразования и дилатантно-диффузионной теории, связывающих подготовку магистрального разрыва с образованием и взаимодействием в среде множества мелких трещин. Однако при анализе САЭ в рамках таких моделей трещинообразования появляется непреодолимая трудность: как в рамках моделей трещинообразования совместить постоянно присутствующее естественное высокочастотное акустическое излучение с наблюдаемой целостностью излучающей области?

Иначе обстоит дело при явном учете дискретного строения земной коры. Макроскопические напряжения в дискретной среде, состоящей из блоков различного масштаба, передаются через силы, действующие на контактах соседних элементов. Деформирование такой среды неизбежно сопровождается проскальзыванием по границам элементов, что сопровождается излучением упругих волн, т.е. сейсмоакустической эмиссией. Сейсмоакустическая эмиссия, таким образом, оказывается прямо связанной с деформационными процессами в земной коре и распределением элементов коры по размерам [11 - 13].

Была проведена длительная цифровая регистрация САЭ в полевых условиях. Большую помощь при разработке сейсмоакустической аппаратуры и методики полевых исследований нам оказали и продолжают оказывать сотрудники Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта чл.-корр. РАН А.В. Николаев, чл.-корр. РАЕН О.Б. Хаврошкин и В.В. Цыплаков. При проведении натурных измерений САЭ в полевых условиях большую методическую помощь мы получаем от сотрудников Института сейсмологии АН Туркменистана д. ф.-м. н. Б.С. Каррыева и академика АНТ Т.А. Аширова, совместно с которыми получен ряд принципиально важных результатов.

Акустические сигналы естественного происхождения отличаются сильной неоднородностью. Для выделения информативных параметров из таких сигналов весьма успешными оказались методы фрактального анализа (см. [14]), которые можно пояснить на следующем примере. Предположим мы имеем результаты регистрации амплитуды

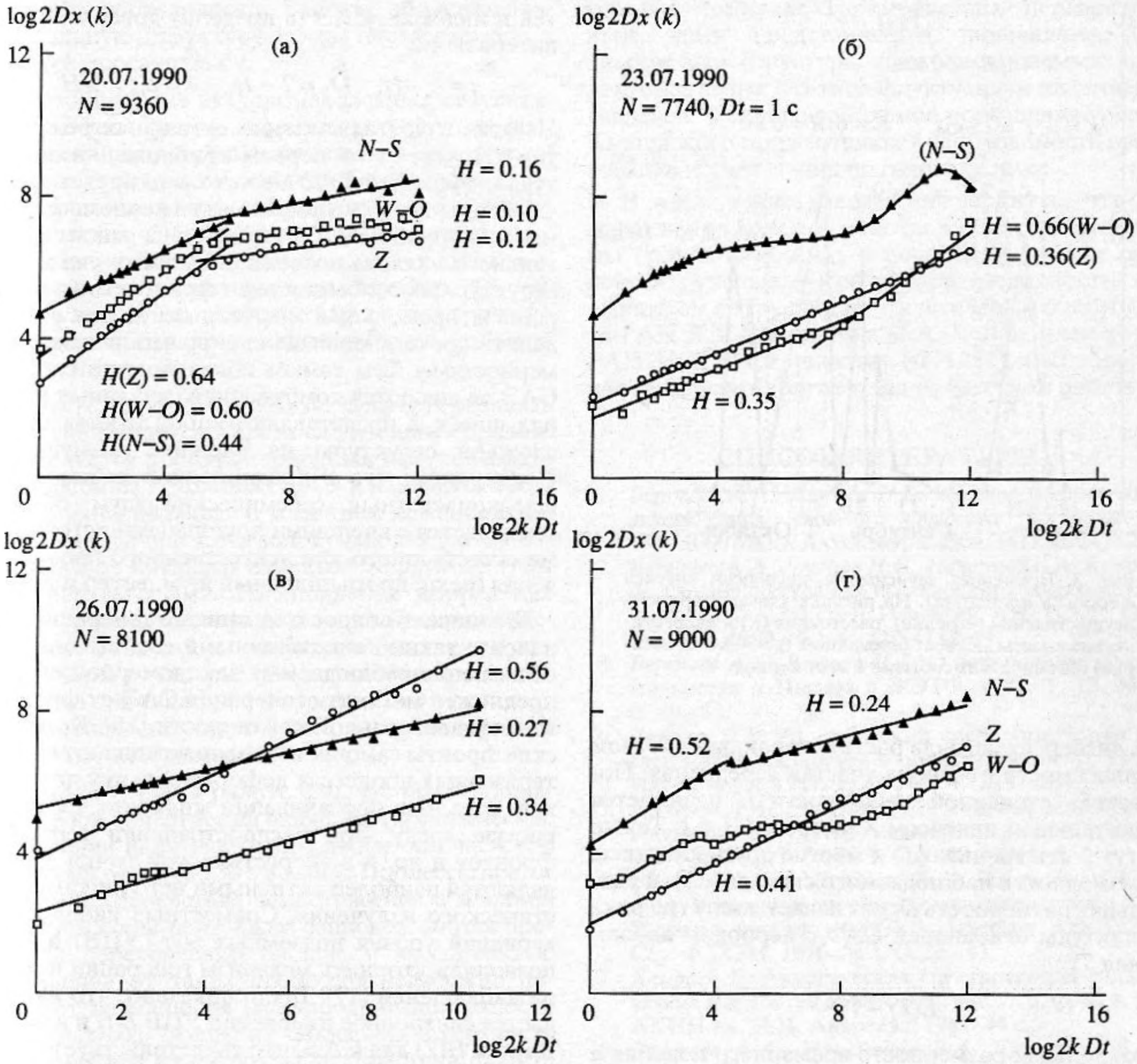

Рис. 2. Результаты регистрации САЭ, связанные с сейсмическим событием $K = 6$ энергетического класса (энергии 10^K Дж) от 25 июня 1990 г., произошедшего на глубине 10 км непосредственно под пунктом регистрации: а – за 5 сут до указанного события, б – за 38 ч до события, в – через сутки после события, г – через 6 сут. На рисунке указаны: N – число отсчетов, H – индекс Херста для приемников САЭ различной ориентации: Z – вертикальной, W–O – запад–восток, N–S – север–юг.

огибающей САЭ $x(i\Delta t)$, $i = 1, 2, \ldots, N$, Δt – период опроса, и вычисляем среднее значение $\langle x \rangle$ и дисперсию σ^2 амплитуды по всей длине реализации. Если среднее значение и дисперсия амплитуды, вычисленные по коротким, но представительным участкам, остаются приблизительно постоянными (или хотя бы конечными) по всей длине реализации, то для обработки экспериментальных результатов можно использовать, например, хорошо разработанные методы спектрального анализа или следить за вариациями среднего и дисперсии в зависимости от условий регистрации. При таком подходе первым необходимым этапом является выбор длины участка усреднения для получения среднего и дисперсии. Оказывается, что для сигнала САЭ такой подход не применим: и дисперсия и приращение огибающей зависят от длины участка усреднения. Например,

$$\begin{cases} \sigma^2(n\Delta T) = (1/n\Delta t)\int_0^{n\Delta t} [x(t) - \langle x \rangle]^2 dt = C(nDt)^{2H}, \\ C = \text{const}, \end{cases}$$

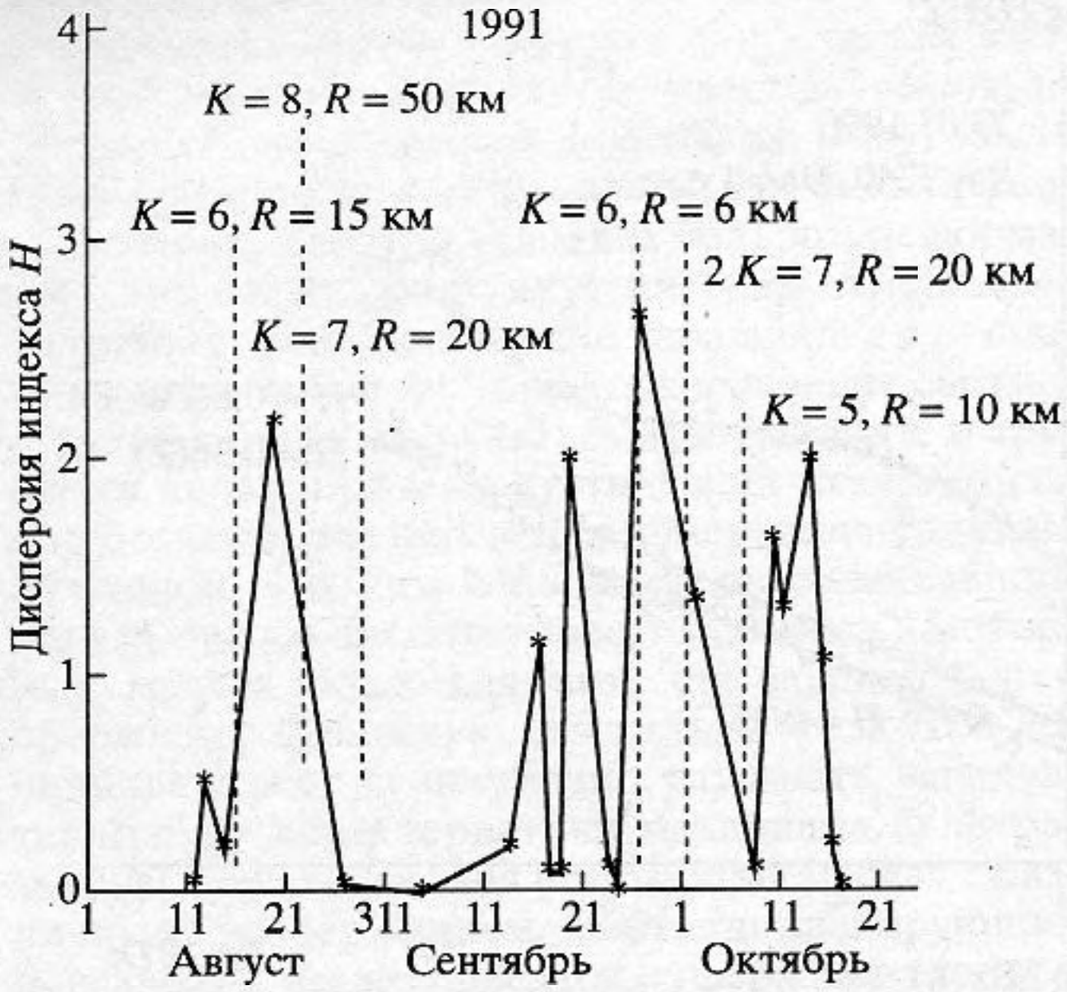

Рис. 3. Временна́я зависимость дисперсии индекса Херста (в процентах). На рисунке указаны времена осуществления (стрелки), расстояния (R) и энергетические классы (K) всех ближайших (до 50 км от станции) сейсмических событий в этот период.

т.е. дисперсия сигнала растет степенным образом в зависимости от длины участка усреднения. Показатель степенной зависимости H называется фрактальным индексом Херста, $0 < H < 1$. Также могут быть вычислены и многие другие индексы и размерности наблюдаемого сигнала [15]. Фрактальная размерность D_L связывает длину графика амплитуды огибающей САЭ с периодом наблюдения T:

$$L(T) \sim T^{DL}.$$

Фрактальная размерность временно́го подобия a связывает число выбросов огибающей с периодом наблюдений:

$$N \sim T^a,$$

а фрактальная размерность энергетического подобия g связывает число выбросов с их общей энергией (суммой квадратов амплитуд):

$$N \sim E^g.$$

Для динамических систем с хаотическим поведением корреляционная размерность Грассбергера–Прокаччиа ν является одной из характеристик "странного аттрактора" таких систем. Но для стохастических систем со степенным энергетическим спектром мощности корреляционная размерность ν является оценкой латентной размерности случайного блуждания [16]. Существуют некоторые теоретические соотношения, которые выполняются для фрактальных размерностей и индексов САЭ (в пределах доверительных интервалов):

$$a = 1 - H, \quad D_L = 2 - H, \quad \nu = d_w = 1/H.$$

Из этих и других экспериментальных результатов следует, что в первом приближении амплитуда огибающей САЭ может быть представлена фрактальным броуновским движением. Новые методы обработки СА-сигналов на основе фрактального анализа позволили выявить ряд новых структурных особенностей – фрактальность процесса на временно́й и энергетической оси, и определить соотношения между фрактальными размерностями. Тем самым показано, что сигналы САЭ не являются комбинацией случайных внешних помех, а представляют собой отклик среды сложной структуры на внешнее возмущение. Подчеркнем, что в традиционной сейсмологии высокочастотный сейсмический шум обычно связывается с внешними локальными источниками естественного или искусственного происхождения (реки, промышленный шум, ветер и др.).

Возникает вопрос о механизме генерации сигналов с такими специфичными свойствами. Для объяснения наблюдаемых закономерностей был предложен механизм генерации САЭ от фронтов самоорганизованной критичности [15]. Критические фронты самопроизвольно возникают при естественных процессах деформирования дискретных сред, при просачивании жидкости через пористую среду, при распространении тепловых фронтов и др. и с энергетической точки зрения являются наиболее активными источниками акустического излучения. Совместные наблюдения вариаций уровня подземных вод (УПВ) и САЭ позволяли уточнить механизм генерации в районе наблюдений [17]. Было показано, что наблюдается синхронное изменение УПВ $L(t)$ и индекса Херста $H(Z)$ для САЭ, что свидетельствует о взаимосвязи процессов вариаций уровня подземных вод и САЭ, и позволяет связать механизм генерации САЭ с фронтами просачивания грунтовых вод в пункте регистрации. Давно замечено, что квазистатическое замещение одной жидкости в пористой среде другой несмешивающейся жидкостью генерирует флуктуации давления. Такие флуктуации давления, называемые "скачками Хайнеса" или "реонами", обусловлены неустойчивостью конфигурации фронта просачивания. Скачкообразное движение жидкости генерирует флуктуации давления, которые и являются источником акустического излучения при просачивании. Структура фронта просачивания прямо связана со структурой порового пространства земной коры и представляет интерес как для многих областей геофизики, так и для многочисленных технических приложений, например, газо-жидкостные фронты в нефтяных и газовых месторождениях. Но только в последнее время

появились теоретические работы, объясняющие фрактальную структуру шума, наблюдаемого в процессе просачивания.

При обработке экспериментальных результатов, полученных при цифровой регистрации огибающих САЭ на трехкомпонентных сейсмоакустических приемниках, найден новый эффект, заключающийся в том, что до и после близких сейсмических событий различные геометрические компоненты САЭ демонстрируют анизотропию своих вероятностных характеристик [18, 19]. Пример поведения акустических параметров при регистрации близкого сейсмического события показан на рис. 2.

Анизотропию САЭ можно охарактеризовать дисперсией индекса Херста следующим образом. Определяется короткопериодный индекс Херста для каждой из компонент САЭ и находится среднее значение индекса по всем трем компонентам. Дисперсия вычисляется как сумма квадратов отклонений от среднего индексов Херста по трем компонентам шума. Наблюдаемая корреляция между временами осуществления близких сейсмических событий и амплитудой дисперсии индекса Херста (см. рис. 3) позволяет предположить, что причиной анизотропии САЭ могут служить процессы подготовки и последействия местных землетрясений.

Нами показано в работе [20], что причиной наблюдаемой анизотропии являются гармонические возмущения инфразвукового диапазона частот, с периодами от 8 с до 250 с и выше. Процессы подготовки и последействия землетрясения в блочной структуре коры неизбежно сопровождаются процессами переупаковки блоков, и механические возмущения от таких процессов неизбежно порождают возмущения на свободной поверхности грунтовых вод. Волны на свободной поверхности грунтовых вод изменяют характеристики фронта просачивания и генерируемого этим фронтом акустического излучения, что и приводит к наблюдаемой анизотропии сигналов САЭ в период подготовки и последействия близких землетрясений.

Акустические исследования, начавшиеся в Туркменистане с акустической спектроскопии жидкостей в 50-х годах, продолжают расширяться. Лаборатории акустической спектроскопии организованы в Туркменском институте народного хозяйства (проф. Б. Хемраев), в Туркменском государственном медицинском институте (проф. Г.А. Назарова). По атмосферной акустике получены первые обнадеживающие результаты, имеющие значение для оперативного прогноза землетрясений (М. Гошджанов). Исследования по мощному ультразвуку находят применения в газохимической промышленности (Б. Овлякулев) и медицине (В. Карабаш). Широкое поле деятельности для геоакустики представляет нефтегазовый комплекс Туркменистана, перспективным здесь представляется направление по диагностике структуры низкопроницаемых коллекторов нефти и газа по флуктуациям пластового давления. В связи с проблемой повышения уровня Каспийского моря возникает необходимость организации исследований по гидроакустике.

В заключение следует подчеркнуть, что на протяжении всех лет работы в области акустики мы получали помощь и поддержку многих российских ученых. Особую признательность мы выражаем сотрудникам Акустического института РАН Л.М. Лямшеву и И.А. Чабан, член-корр. РАН И.Л. Фабелинскому (ФИАН), с которыми нас связывают долгие годы совместной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бердыев А.А., Лежнев Н.Б.* Методы исследования акустических свойств жидкости на частотах 300 - 1000 МГц // Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 247 - 250.
2. *Бердыев А.А., Лежнев Н.Б., Назарова Г.А.* Акустическая аппаратура для исследования жидкостей на частотах 2 - 3 ГГц // Известия АН ТССР. Сер. ФТХГН. 1969. № 1. С. 110 - 112.
3. *Бердыев А.А. Лежнев Н.Б.* О поперечном звуке в жидкостях // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. № 1. С. 49 - 52.
4. *Лежнев Н.Б.* Акустический спектрометр для исследования жидкостей в области частот 10 ГГц // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 275 - 284.
5. *Бердыев А.А., Лысенко В.А., Хемраев Б.* Скорость и поглощение ультра- и гиперзвука в глицерине // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. № 9. С. 1040 - 1044.
6. *Баранский К.Н., Бердыев А.А., Писаревский Ю.В. и др.* Условия распространения гиперзвука в X- и Y-срезах ниобата лития // Известия АН ТССР. Сер. ФТХГН. 1976. № 1. С. 37 - 41.
7. *Хемраев Б.* Акустическая спектроскопия сильновязких жидкостей // Автореф. дис. ... д. ф.-м. н. М.: АКИН им. Н.Н. Андреева, 1981. 44 с.
8. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А., Троицкий В.М., Хемраев Б.* Поглощение в вязких жидкостях выше дисперсионной области // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 4. С. 481 - 486.
9. *Бердыев А.А., Троицкий В.М., Рудин А.В.* Некоторые аномалии релаксационного поведения переохлажденных жидкостей // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 2. С. 235 - 245.
10. *Мухамедов В.А., Рудин А.В., Троицкий В.М.* Акустические исследования релаксации в стеклующихся объектах при различных режимах деформирования // XI Всесоюз. акуст. конф. Доклады. М., 1991. Секция Г. С. 17 - 21.
11. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А.* О напряженном состоянии кусковатой среды // Доклады АН СССР. 1985. Т. 281. № 4. С. 817 - 821.
12. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А.* Землетрясения – фликкер-шум? // Доклады АН СССР. 1987. Т. 297. № 5. С. 1077 - 1982.
13. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А.* О наблюдениях скоростей сейсмических волн с целью прогноза разрушения геофизической среды // Доклады АН СССР. 1988. Т. 288. № 3. С. 578 - 581.

14. *Лямшев Л.М.* О книге Френсиса Муна "Хаотическая и фрактальная динамика" // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 3. С. 527 - 528.
15. *Мухамедов В.А.* Фрактальные свойства высокочастотного сейсмического шума и механизмы его генерации // Известия РАН. Физика Земли. 1992. № 3. С. 39 - 49.
16. *Мухамедов В.А., Каррыев Б.С., Канель Е.Г.* Временны́е вариации фрактальных размерностей сейсмичности // ДАН СССР. 1991. Т. 322. № 3. С. 478 - 483.
17. *Бердыев А.А., Аширов Т.А., Ишанкулиев Г.А., Мухамедов В.А.* Многомасштабность процесса вариаций уровня подземных вод и структура фронта просачивания // Доклады РАН. 1992. Т. 324. № 4. С. 835 - 841.
18. *Мухамедов В.А., Мурадов В.А., Сеидова Б.А.* Фрактальные размерности акустической эмиссии дискретной геофизической среды // XI Всесоюз. Акуст. конф. Доклады. М. 1991. Секц. Е. С. 33 - 36.
19. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А., Мурадов В.А., Сеидова Б.А.* Анизотропия высокочастотного сейсмического шума при местных землетрясениях // Доклады РАН. 1992. Т. 322. № 3. С. 484 - 489.
20. *Бердыев А.А., Мухамедов В.А.* Инфразвук в высокочастотном сейсмическом шуме // Доклады РАН. 1993. Т. 329. № 3. С. 290 - 294.

Acoustics in Turkmenistan

A. A. Berdyev and V. A. Mukhamedov

Physicotechnical Institute, Academy of Sciences of Turkmenistan, ul. Gogolya 15, Ashgabat, 744000 Turkmenistan

Abstract – The origin and evolution of acoustic research in Turkmenistan is traced. Key achievements in acoustic spectroscopy of liquids and in geoacoustics in recent years are presented. Prospects of acoustic investigations are discussed.