

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 551.550

РЕЗОНАНСНЫЕ ЛИДАРЫ В ГЛОБАЛЬНОМ МОНИТОРИНГЕ ПРИМЕСЕЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

М.Ф. ЛАГУТИН, А.А. ЗАРУДНЫЙ, В.Н. КУЗЬМЕНКО, Г.Ф. ТУЛИНОВ

Анализируются возможности метода и радиоэлектронной (лазерной) аппаратуры резонансной локации примесей мезосферы в интересах прикладной геофизики. Приводятся результаты дистанционного зондирования на сети среднеширотных станций ХНУРЭ и в период широтных лидарных экспериментов, связанных с анализом движения корабля в Атлантике из северного полушария в южное и обратно. Обсуждаются результаты глобального мониторинга динамики концентрации натрия с учетом влияния геомагнитных и акустогравитационных возмущений атмосферы Земли.

Potentialities of the method and radioelectronic (laser) equipment of resonance location of the mesospheric admixtures in the interests of applied geophysics are analyzed. The results of remote probing in a network of the KNURE middle latitude stations and in the period of latitudinal lidar experiments connected with analysis of board a ship sailing in the atlantic ocean from the modern hemisphere to the southern one and backwards. The results of global monitoring of the sodium concentration dynamics in view of the effects of geomagnetic and acoustogravitational disturbances of the Earth's atmosphere are discussed.

1. Возможности метода резонансного зондирования

Прикладное значение лидарных систем при дистанционном мониторинге процессов, происходящих в околоземной воздушной среде, обязано большой величине сечения резонансного взаимодействия излучения оптического диапазона с атомами примесей атмосферы. Сечение аэрозольного и молекулярного (рэлеевского и комбинационного рассеяния) частицами воздуха и примесей атмосферы в этом диапазоне на много порядков меньше резонансного. Это обстоятельство определило успех применения методов пассивной и активной резонансной локации примесей щелочной группы металлов естественного и искусственного происхождения в той части атмосферы, где маскирующая роль сигналов упругого рассеяния меньше, чем уровень сигналов резонансного рассеяния. Эти условия выполняются на высотах страто-, мезосферы и термосферы Земли. Очевидны преимущества глобальных дистанционных исследований примесей со спутников и космических станций бортовыми лидарными средствами. Однако информативность лидарных средств, базирующихся на аэрокосмических носителях, существенно зависит от наличия подспутникового обеспечения исследований одних и тех же явлений в атмосфере. Системы российско-украинских лидарных наземных средств составляют в настоящее время основу для обеспечения программ дистанционного зондирования атмосферы из космоса [1].

В интересах прикладной геофизики, метеорологии в верхнюю атмосферу инжектируют щелочные металлы (Na, Ba, Li, Sn, Cs, и др.) искусственного происхождения, трассирующие динамические процессы. Для

фундаментальных исследований динамики магнитосферы (ионосферы) используют ионизируемые солнечным излучением примеси, которые выбрасываются с борта геофизических ракет и межпланетных космических станций. Также исследуются ионы той же группы, захваченные магнитным полем Земли из плазмы солнечного ветра. Известно, что при выбросе, например, 1 кг лития, на высоту 1000 км, он ионизируясь фотонами Солнца, за несколько суток распространяется за счет особых электродинамических условий по всей экзосфере. Перемещаясь между полюсами и по долготе со скоростью в несколько километров в секунду, литий обнаруживается в любой точке земного шара.

Эрруктивные процессы на Земле, обязанные солнечно-земному взаимодействию, вызывают вулканические извержения вещества, достигающего высоты мезосферы (~ 100 км). Глобальные наблюдения за концентрацией атомов и аэрозоля вулканического происхождения позволяют оценивать их влияние на радиационные процессы в атмосфере, что важно для анализа глобальных изменений климата.

«Выметаемая» Землей твердая составляющая космического пространства, пребывающая в районе ее орбиты, составляет основной источник поступающего в атмосферу вещества, компенсирующего потери Земли газов, постоянно покидающих верхнюю атмосферу планеты.

На высоте мезосферы и нижней термосферы происходит торможение, нагревание и испарение твердых метеорных частиц. В результате этих процессов абляции вокруг Земли постоянно существует на высоте 75...130 км слой ионов и атомов вещества практически всех элементов таблицы Менделеева.

Термодинамическое неравновесное состояние атмосферы Земли приводит к тому, что она турбулизуется до высоты турбопаузы (~ 130 км). Поэтому в ней частицы воздуха и примеси метеорного и иного происхождения равномерно перемешаны.

На таком естественном фоне наблюдается аномально повышенная концентрация метеорной примеси за счет притока вещества ежегодных и неперiodических струйных метеорных потоков. Таким образом, для изучения аэрономических процессов мезосферы предлагается использовать аномалии «инъекции» вещества метеорных потоков, не прибегая к антропогенным технологиям [2].

Испытания ядерных и термоядерных зарядов в атмосфере Земли, как известно, в настоящее время запрещены, как и иные искусственные воздействия на атмосферу любой природы, так как они создают непредсказуемые экологические проблемы в атмосфере Земли. К числу специфических проблем относятся присутствующий в околоземном пространстве космический «мусор», представляющий собой остатки конструкций, деталей ранее проводившихся космических экспериментов. В космическом пространстве применяются технологии на основе ионных двигателей, а также проводят испытания и эксперименты при разработке противоракетных технологий, отрицательные последствия от которых еще не в полной мере оценены. Лидарные технологии дистанционного обнаружения указанных явлений остаются актуальными.

В рамках решения проблем астероидной безопасности планируется применение термоядерных воздействий для коррекции орбиты астероидов, при этом в космосе может возникнуть облако примесей лития и других атомов и ионов, резонансная локация которых позволит оценить эффективность воздействия и другие последствия, сопровождающие эти процессы.

Не вызывает сомнений актуальность дальнейшего совершенствования методов резонансной локации примесей и создания более совершенных лидаров в задачах локальных и глобальных исследований процессов с использованием примесей в качестве трассеров в экзосфере и ближнем космосе.

2. Лидарная аппаратура и методика резонансного зондирования примесей

Общий принцип лидарного зондирования атмосферы аналогичен принципу радиолокации с той лишь разницей, что вместо радиоволн используется электромагнитное излучение в видимом диапазоне. Лазерное излучение частично поглощается и рассеивается атмосферными компонентами. Часть рассеянного назад излучения попадает на приемную систему, обеспечивающую высотную регистрацию сигнала. Основные механизмы рассеяния лазерного излучения атмосферой, используемые при высотном зондировании – это молекулярное, аэрозольное (Ми) и резонансное. Эффект молекулярного или рэлеевского рассеяния (эффективное сечение рассеяния назад $\sigma_{\pi}^{\text{р}} \sim 10^{-28}$ см² ~

$\sim \lambda^{-4}$) лежит в основе работы рэлеевского лидара, обеспечивающего получение вертикального профиля плотности и соответственно температуры атмосферы. Аэрозольное или Ми-рассеяние ($\sigma_a^{\text{р}} \sim 10^{-10}$ см² ~ $\sim \lambda^{-2.5} - \lambda^{-1.5}$) используется для регистрации профиля атмосферного аэрозоля на высотах 10...30 км. Резонансное рассеяние для некоторых атмосферных компонент достаточно эффективно. Значение $\sigma_{\rho}^{\text{р}}$ меняется в пределах от 10^{-12} см² для атомов до 10^{-17} см² для молекул. Метод резонансного рассеяния нашел широкое применение для регистрации высотных профилей щелочных металлов (Na, K, Li), находящихся в естественном состоянии на высотах 80...100 км. Особенно развита техника лидарных наблюдений мезосферного натрия. Структурная схема типичной резонансной лидарной системы представлена на рис. 1. При зондировании атмосферы, передатчик настраивается на резонансную линию поглощения атома. В большинстве случаев используются лазеры на красителях, накачиваемые лампой-вспышкой. Небольшая часть излучения лазера направляется на датчики спектрального контроля и энергии, а также на импульсный фотодетектор, который синхронизирует работу передатчика и приемного устройства. Импульс лазерного излучения достигает слоя мезосферной примеси и переводит атомы в возбужденное состояние. Время жизни атома в возбужденном состоянии ($\sim 10^{-9}$ с) значительно меньше среднестатистического интервала между столкновениями на этих высотах ($\sim 10^{-6}$ с), поэтому тушением флуоресценции можно пренебречь и полагать, что при переходе в основное состояние практически все возбужденные атомы изотропно переизлучают. Рассеянное назад излучение собирается телескопом и фокусируется на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ). Вследствие очень низкого уровня принимаемого сигнала ФЭУ обычно работает в режиме счета фотонов. Для подавления фоновой засветки фотоприемника излучением, рассеянным с низких высот, используется механический затвор-обтюратор, синхронизирующий включение лазера в момент перекрытия ФЭУ с помощью оптопары светодиод-фотодиод. Полевая диафрагма ограничивает угол зрения приемного телескопа, а интерференционный фильтр подавляет большую часть фонового излучения за пределами спектра излучения лазера. Сигнал ФЭУ обрабатывается импульсным усилителем-дискриминатором, а также счетчиком, стробируемым по дальности. На выходе импульсного дискриминатора получают логические импульсы, которые затем можно считать с помощью стандартных быстродействующих цифровых схем. Лидарные данные представляют собой серии импульсов, соответствующих последовательным интервалам разрешения по дальности. Уровень сигнала от единичного лазерного импульса, как правило, является недостаточным для восстановления профиля концентрации примеси, поэтому в зависимости от требуемой точности измерений фотоны накапливаются по нескольким импульсам в течение времени, определяемым энергетическими характеристиками лидара.

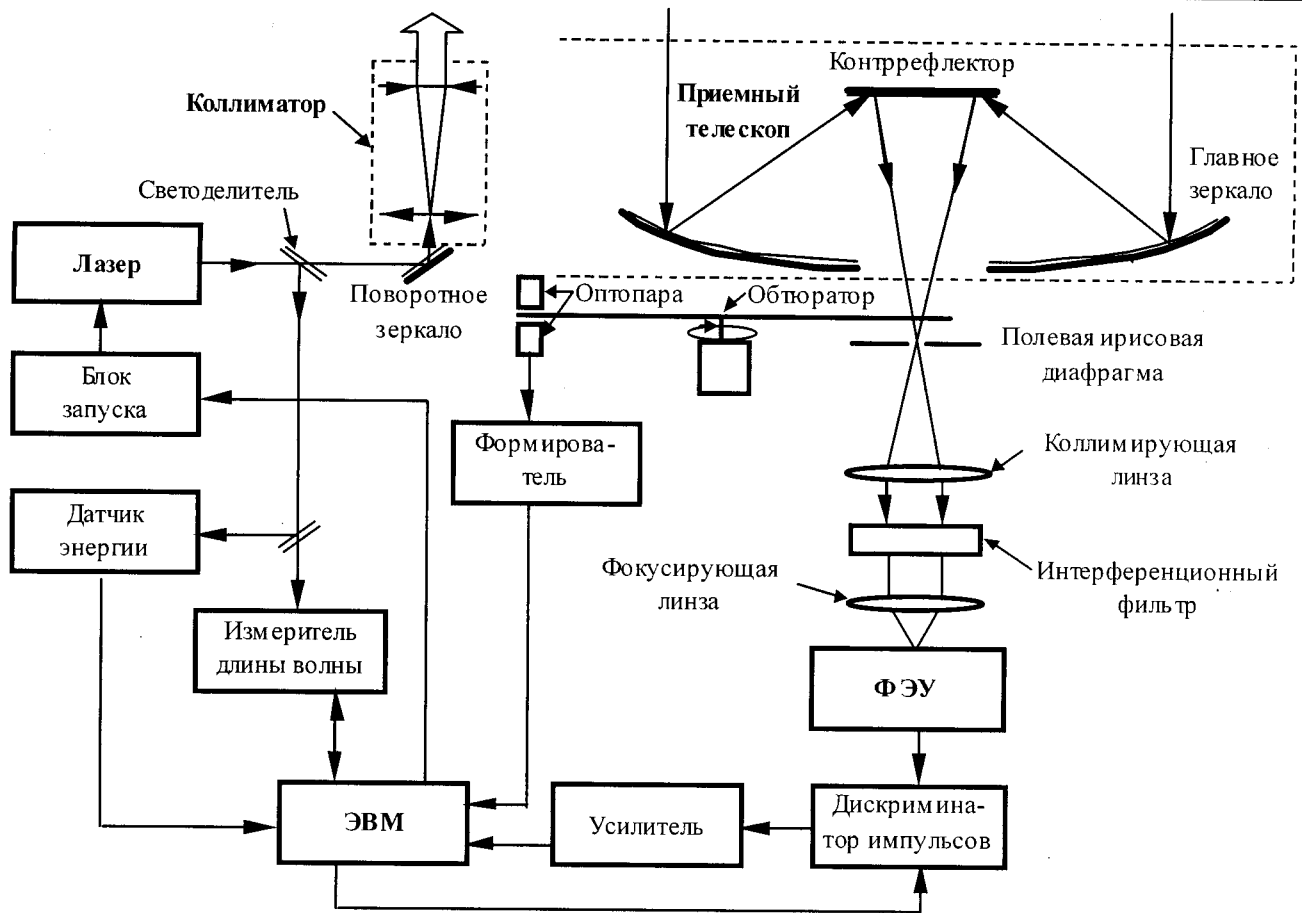


Рис. 1

Число фотонов $N(z)$, рассеянных назад с высоты z и регистрируемых приемной системой лидара описывается уравнением лазерной локации

$$N(z) = (\eta T_z^2) \left(\frac{E_0}{h\nu} \right) \left(\frac{S_{np}}{4\pi z^2} \right) \Delta z \times \quad (1)$$

$$\times [n_m(z)\sigma_m^\pi + n_a(z)\sigma_a^\pi + n_p(z)\sigma_p^\pi],$$

где η – оптический КПД лидара, равный произведению коэффициентов пропускания приемной и передающей оптики; T_z – однопроходовой коэффициент пропускания атмосферы; E_0 – энергия излучения передатчика; h – постоянная Планка; ν – частота излучения; S_{np} – площадь апертуры приемного телескопа; Δz – длина интервала разрешения по дальности; $n_m(z)$, $n_a(z)$, $n_p(z)$ – концентрации атмосферных компонентов, рассеивающих лазерное излучение в соответствии с указанными выше физическими процессами молекулярного, аэрозольного и резонансного рассеяния на дальности z . Это уравнение лежит в основе работы всех лидаров.

Методика определения высотного профиля концентрации мезосферного натрия [3] базируется на использовании уравнения лазерной локации. При расчете плотности Na производится нормировка измерений к сигналу, отраженному от атмосферы на высотах порядка 30...40 км, где рассеяние считается чисто молеку-

лярным. Плотность атмосферы берется из модели или прямых аэрологических наблюдений. Используя значения сигналов, полученных с нормированных высот z_R и от натрия z_i , и выраженных через параметры уравнения лазерной локации, получим упрощенное выражение для определения концентрации натрия в i -м слое, толщиной Δz на высоте z_i

$$n_i = \frac{\sigma_m^\pi(z_i + \Delta z/2)^2}{\sigma_p^\pi z_R^2} \frac{N_i}{N_R} n_R, \quad (2)$$

где N_R и N_i – лидарные сигналы на высотах z_R и z_i соответственно; $n_R = 3,69 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $\sigma_m^\pi = 5,2 \cdot 10^{-31} \text{ м}^2$ – на высоте $z_R = 30$ км (CIRA-1972).

Ошибка в определении концентрации естественного натрия с учетом всех методических погрешностей и используемой модели составляет примерно 20...25%.

Методика измерения плотности и температуры высоких слоев атмосферы впервые была разработана и реализована в натуральных экспериментах по лидарному зондированию атмосферы в области молекулярного рассеяния (30...80 км) группой французских ученых [4]. Методика и алгоритмы математической обработки измерений плотности, основанные на этих результатах, подробно изложены в работе [5]. Высотный температурный профиль $T(z)$ рассчитывается из высотного профиля плотности с использованием барометрического закона по формуле

$$T(z) = \frac{Mg(z)\Delta z}{R \ln \left[\frac{P(z - \Delta z/2)}{P(z + \Delta z/2)} \right]}, \quad (3)$$

где M – средняя молекулярная масса атмосферы; $g(z)$ – ускорение свободного падения; $P(z)$ – профиль атмосферного давления.

Расчет температурного профиля производится путем нормирования высотного профиля давления в его верхней части к значению давления, взятого из моделей.

Погрешность определения давления в верхней части профиля вследствие его экстраполяции оценивается в 15 %. Вклад этой погрешности в погрешность определения температуры быстро убывает с понижением высоты. Погрешность становится менее 2 % при снижении на 15 км от вершины профиля и около 1 % при снижении соответственно на 20 км.

Передачик является ключевым и наиболее сложным элементом резонансного лидара. К его характеристикам предъявляются весьма жесткие и, зачастую, противоречивые требования. Анализ работ, посвященных передающей аппаратуре, используемой в резонансных лидарах, показывает, что в качестве излучателей в них применяются как лазеры с когерентной накачкой, так и лазеры на красителях с ламповой накачкой. При сопоставимых значениях средней мощности последние имеют преимущество в энергии излучения в импульсе. В оптических схемах ламповых генераторов, как правило, используется плоскопараллельный резонатор, что продиктовано, по крайней мере, двумя обстоятельствами. Во-первых, как известно, использование плоскопараллельного резонатора обеспечивает заполнение модами резонатора всего объема активной среды, что немаловажно в условиях, когда от генератора требуется максимальная энергетическая эффективность. Во вторых, применение плоскопараллельного резонатора упрощает взаимную юстировку осей приемника и передатчика.

Наиболее важным является спектральный контроль излучения, поскольку при резонансном способе зондирования данные о спектральных характеристиках излучения самым непосредственным образом влияют на точность измерений. В основном используются два способа контроля длины волны либо их комбинация. В первом из них используются вакуумированные резонансные камеры, содержащие насыщенные пары атомов исследуемого вещества [6, 7]. Излучение генератора пропускается через резонансную ячейку. При совпадении длины волны излучения с контуром поглощения вещества, наблюдается интенсивное переизлучение, регистрируемое фотоприемником. Информация о настройке в этом случае содержится в амплитуде импульсов на выходе фотоприемника. Резонансный способ контроля достаточно прост в реализации и в силу принципа действия обладает исключительной достоверностью. Наиболее существенным его недостатком является отсутствие информации о знаке расстройки, что делает неудобным использование резонансных ячеек в системах автоподстройки.

В качестве одного из резонансных способов контроля длин волн излучения в настоящее время широкое практическое применение находит оптогальванический эффект, заключающийся в изменении сопротивления в лампах с полым катодом при воздействии лазерного излучения [8]. Лампы с полым катодом (ЛПК) используются в спектроскопии высокого разрешения для калибровки спектральных приборов. Спектр излучения ламп определяется материалом катода. Лампы являются слаботочными (рабочий ток в непрерывном режиме составляет не более десятков миллиампер), и их достоинством являются малая спектральная ширина линий излучения. Распыление материала полого катода происходит за счет воздействия ионов разряда, заполняющего лампу буферного газа (неона, аргона и др.). Воздействие на разрядный промежуток лампы излучения с частотой, соответствующей частоте резонансного перехода, увеличивает вероятность ионизации и, таким образом, увеличивает число носителей зарядов.

Экспериментальные исследования с участием авторов [9–11] показали, что такая техника может быть использована для настройки длины волны излучения лазеров на красителях с помощью промышленных ламп [12]. Наибольшая интенсивность излучения достигается в импульсном режиме включения, когда в течение короткого промежутка времени ток через лампу увеличивается до нескольких сотен миллиампер [8]. Исследования спектров излучения ламп в импульсном режиме показали, что уширение спектра по сравнению с непрерывным режимом горения может быть незначительным, поскольку ширина спектра излучения определяется средним током, протекающим через лампу. Номенклатура ламп с полым катодом, выпускаемых различными фирмами, достаточно велика, что позволяет широко их использовать в системах настройки перестраиваемых лазеров [12].

Второй способ настройки основан на интерферометрических методах контроля с помощью измерительных эталонов Фабри-Перо и Физо [13–14]. Измеритель такого типа включает несколько эталонов (до четырех) с различными базами и работает по принципу последовательного уточнения длины волны. Интерференционная картина фиксируется с помощью позиционно-чувствительных элементов типа фотодиодных либо ПЗС матриц [15]. Положение максимумов интерференционной картины зависит от длины волны излучения. Для однозначности процедуры определения длины волны необходима достаточно сложная процедура аттестации эталонов, заключающаяся в точном (до долей длин волн) определении их баз. Измерители такого типа являются уникальными и чрезвычайно дорогими устройствами, использование которых не всегда экономически целесообразно. Достоинством метода настройки является возможность измерений в широком спектральном диапазоне и высокая точность спектрального анализа излучения. В отличие от резонансных методов контроля интерферометрические дают информацию о знаке расстройки

длины волны излучения относительно спектра поглощения исследуемого вещества.

В разработанных передатчиках применялись комбинированные измерительные устройства, сочетающие визуальный метод контроля (спектроскоп), набор резонансных ячеек и один измерительный эталон. Использовались два варианта построения измерителей длины волны излучения. В первом из них применялся резонансный способ контроля в сочетании с визуальным контролем с помощью спектроскопа [16]. Второй вариант дополнялся одноканальным измерителем на базе интерферометра Физо [17]. В последнем случае имелась возможность анализа формы спектральной линии излучения.

Схема измерителя, построенная по второму варианту [17], представлена на рис. 2. Процесс настройки включает несколько этапов. На первом этапе происходит визуальная настройка с помощью линзового спектроскопа, собранного на базе дифракционной решетки. Посредством угловой перестройки внутрирезонаторных интерферометров линия излучения передатчика совмещается с линией от спектральной лампы, помещенной перед щелью спектральной лампы. В качестве спектральной лампы может быть использована лампа с полым катодом или любая другая лампа, имеющая в своем спектре линию излучения исследуемого вещества. На втором этапе производится точная настройка длины волны генерации по максимуму отклика измерительной лампы с полым катодом. Одновременно с этим производится калибровка измерительного эталона, в результате которой фиксируется положение максимума интерференционной картины, соответствующее настройке на линию. В дальнейшем настройка контролируется с помощью ЭВМ по положению интерференционной картины. С помощью интерферометра оцениваются ширина и форма спектральной линии излучения, и данные используются для расчета эффективного поперечника резонансного рассеяния. Подобная многоступенчатая процедура настройки исключает возможные ошибки, связанные, например, с появлением двойной линии генерации при неудачной угловой перестройке внутрирезонаторных интерферометров, либо неопределенность, связанную с периодической структурой интерференционной картины измерительного эталона и др. Использование

в схеме измерительного эталона Физо или Фабри-Перо дает возможность одновременно с контролем длины волны оперативно в течение сеанса зондирования отслеживать вариации формы и ширины спектра излучения. При этом аттестация эталона необязательна, поскольку процедура настройки включает периодический контроль положения настройки по отклику лампы с полым катодом.

Рассмотрим основные особенности построения лида на примере станции резонансного зондирования в г. Ашхабаде. Передатчик Ашхабадской станции для исследований мезосферных примесей состоит из идентичных четырехламповых конструкций задающего генератора и однопроходового усилителя, собранных на базе двойных эллиптических рефлекторов [9]. Осветители изготовлены из алюминиевого сплава с последующим напылением алюминия в вакууме. Генератор и усилитель имеют общие системы прокачки рабочего раствора и охлаждения ламп. Этанольный раствор красителя прокачивается со скоростью до 5 л/мин с помощью центробежного насоса с магнитной муфтой. Фильтрация раствора осуществляется фильтром с фильтрующим материалом из нержавеющей стали типа ФСН-4. Лампы расположены в концентрических стеклянных рубашках и охлаждаются дистиллированной водой. Стеклопленочные рубашки выполняют также роль спектрального фильтра, который отсекает УФ излучение ламп короче 0,4 нм. Конструкция лазерной головки обеспечивает быструю смену ламп без разъюстировки резонатора. В качестве активной жидкости при исследовании натрия использовался этанольный раствор родамина 6Ж (589 нм), а для исследований лития – раствор оксазина-17 (671 нм).

Электрические схемы разрядных контуров генератора и усилителя аналогичны и состоят каждая из двух пар последовательно соединенных ламп типа ИСП-5000 и конденсатора емкостью 3 мкФ , коммутируемых общим разрядником типа РУ-70. Для увеличения срока службы ламп и улучшения воспроизводимости характеристик излучения использовалась схема накачки с предымпульсом. При напряжении источника питания 12 кВ, что соответствует энергии, подводимой к каждой лампе, равной 110 Дж, срок службы ламп составляет не менее 10^4 вспышек при частоте повторения 0,2 Гц. Расходимость излучения генератора –

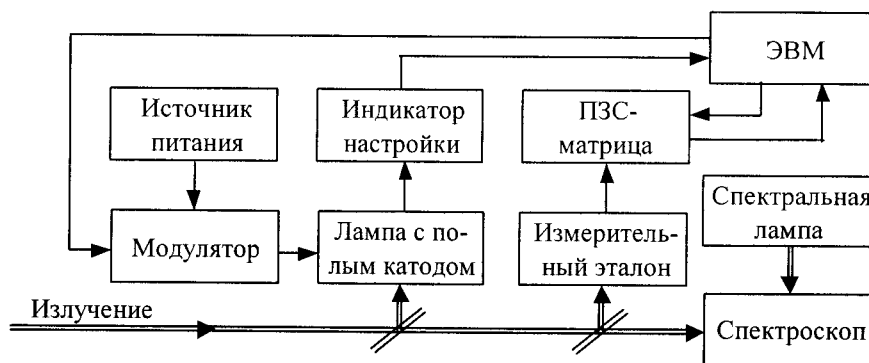


Рис. 2

2,5 мрад. Энергия излучения в импульсе – 0,35 Дж (родамин 6Ж). Генератор работает в условиях более чем двукратного превышения порога. Однопроходный усилитель обеспечивает энергетический коэффициент усиления около 3 без заметного ухудшения спектральных и пространственных характеристик излучения. Для уменьшения расходимости излучения передатчика до уровня 0,5 мрад применялся 6-кратный телескоп-коллиматор.

Диаметр приемного телескопа 1,2 метра. Оптическая схема приемника включала высокоскоростной механический затвор-обтюратор, блок спектральной селекции, регистрирующее устройство на базе ФЭУ-136, а также устройство контроля соосности передатчика и приемника. Лидар использовался в течение ряда лет для систематических исследований динамики натриевого слоя в континентальных условиях и определения содержания в верхней атмосфере изотопов лития. О потенциальных возможностях аппаратуры свидетельствуют измеренные значения концентрации атомов лития около 1 атома в куб. см на высотах порядка 90 км [18].

Отличительной особенностью излучателя Харьковской лидарной станции [17] является наличие более мощного усилителя с энергетическим коэффициентом усиления около 6. В задающем генераторе использовался селектор с базой 2 мм, что дало возможность уменьшить ширину спектра излучения до 5 пм. Для водно-спиртового раствора достигнута расходимость излучения около 0,8 мрад. В связи с уменьшением ширины спектральной линии было модернизировано метрологическое обеспечение. Аппаратура контроля длины волны была дополнена измерителем на базе интерферометра Физо. Диаметр главного зеркала телескопа, собранного по схеме Кассенгрена равен 0,8 метра. Угловое разрешение приемного устройства не хуже 2 угл. секунд. Разработка аппаратуры проводилась в интересах создания комплексов слежения за космическими объектами.

Резонансный лидар, впервые внедренный в практику полярных исследований в 1975 г. (о. Хейса, Земля Франца-Иосифа), состоит из следующих элементов [19]:

лазера на органическом красителе (родамин 6Ж) с энергией излучения в импульсе – 0,5 Дж; длительностью импульса – 3 мкс; длиной волны излучения – 589 нм; шириной линии излучения – 8 пм; частотой повторения 0,25...0,5 Гц и расходимостью луча $5 \cdot 10^{-3}$ рад;

передающей оптики в виде телескопической линзовой системы, обеспечивающей сужение луча до $5 \cdot 10^{-4}$ рад;

приемной системы в виде оптического телескопа кассенгеновского типа с диаметром главного зеркала 410 мм, имеющего параболическую форму; полем зрения – $3 \cdot 10^{-3}$ рад; спектральной полосой пропускания – 2–3 нм; приемно-регистрирующей электроникой.

В более поздние годы возможности лидара были существенно расширены после дооснащения его оптико-механической системой сканирования по небосво-

ду лазерного луча и поля зрения телескопа. Эта система [20], разработанная в Институте прикладной геофизики (Россия), представляет собой высококачественное оптическое зеркало диаметром 1300 мм, смонтированное на поворотном устройстве лафета зенитного орудия. Использование этой системы в составе указанного выше резонансного лидара позволило решить ряд научных и методических задач.

Резонансный лидар на научно-исследовательском судне «Профессор Визе» был разработан Институтом прикладной геофизики (Россия). Он предназначен для регистрации высотных профилей концентрации мезосферного натрия. В качестве излучателя используется лазер с ламповой накачкой на органическом красителе (родамин 6Ж) с фазово-поляризационным селектором, представляющим собой кювету в магнитном поле, заполненную парами натрия при определенной температуре. Излучение осуществляется на длине волны 589,0 нм. Энергия в импульсе составляет 0,3 Дж, частота следования – 5 Гц, расходимость лазерного луча – $5 \cdot 10^{-3}$ рад. Приемно-регистрирующая электроника имеет 1024 канала и обеспечивает прием сигнала в режиме счета фотонов. Высотный шаг зондирования может меняться в пределах 0,3...1,2 км. Первые результаты, характеризующие широтное ($\pm 60^\circ$) распределение мезосферного натрия (интегральное содержание, концентрация, высота максимума слоя), были получены в марте 1991 г.

3. Арктические и антарктические исследования мезосферы

Комплексные исследования метеорной активности [21] и впервые в мировой практике наблюдения ветрового режима мезосферы в Антарктиде на станции Молодежная (67° S) были начаты с сентября 1967 года. По совместной программе Харьковского института радиоэлектроники и Института экспериментальной метеорологии в составе 13-й САЭ, которые проводились одновременно с ракетным зондированием атмосферы в южнополярном регионе. Оценки притока метеорного вещества в атмосферу Антарктиды и ее ветровой режим в целом оказались подобными арктическим условиям острова Хейса (80° N), на котором была установлена аналогичная радиометеорная аппаратура и ракетные комплексы.

Впервые в мировой практике лидарное зондирование полярной мезосферы было выполнено в СССР [19,23] на о. Хейса по программе советско-французского сотрудничества. Первый сеанс состоялся 5 января 1975 г. и показал, что в мезосфере Арктики натриевый слой обнаруживается и его высотное распределение и концентрация аналогичны среднеширотным наблюдениям. Экспериментально доказана возможность эксплуатации такого сложного лазерно-локационного комплекса в трудных условиях центральной Арктики.

Анализ результатов зондирования выявил, что высотный профиль слоя натрия в полярной мезосфере

в среднем представляет асимметричную гауссовскую форму. Максимум концентрации находится на высоте 87 ± 2 км. Общее содержание в столбе в течение года изменяется в диапазоне $6 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{10}$ ат/см². Спорадический рост концентрации иногда достигает $7 \cdot 10^{10}$ ат/см².

Вариации концентрации бывают кратковременными (часы) и долговременными (сезонными). Основной причиной кратковременных вариаций являются не фотохимические, а динамические [24], обязанные действию внутренних гравитационных волн (ВГВ). Другой тип вариаций связан с облачной структурой слоя, которая была зарегистрирована при сканировании лазерным лучом небосвода в трех направлениях [23]. Отмеченная стоячая волновая структура слоя с двумя максимумами объясняется как результат совместного действия турбулентной и молекулярной диффузии. Сезонные вариации концентрации в столбе в Арктике имеют два максимума: в ноябре–декабре и феврале–марте (величиной $3 \cdot 10^{10}$) с понижением концентрации в январе до $1,6 \cdot 10^{10}$. В летний период концентрация снижается до $4 \cdot 10^9$ ат/см². Первый максимум связывают с увеличением мезосферной температуры зимой [24], что снижает скорость реакции убыли натрия при его окислении [25].

Впервые периодические вариации с периодом 1–2 ч были зарегистрированы в экспериментах 1977–1979 гг. [19]. Волновые структуры перемещались с фазовой скоростью 4–5 км/ч. Для волн 2,8...4,5 км [20] эти скорости были в диапазоне 1,2...3,5 км/ч. ВГВ в высоких широтах, как и средних широтах, имеет тропосферное происхождение, обусловленные энергией циркумполярного вихря [23]. И лишь в одном случае удалось зарегистрировать волновой фронт энергии, двигавшейся сверху вниз. В этот период наблюдалось развитие мощной электроструи ($\kappa_p = 5 \dots 7$), которая принципиально может сгенерировать ВГВ на высоте 80...100 км. Доказательством тропосферного происхождения ВГВ является установленный факт противокорреляции ($K = -0,7$) между высотой максимума концентрации слоя натрия и его концентрацией в столбе.

Данные, полученные в Арктике, отличаются от всех известных тем, что наблюдения проводились в самой высокоширотной точке ($80^\circ 37'$ с. ш.). Другие известные высокоширотные данные получены в Андое (69° с. ш.) и на ст. Молодежная (67° юж. ш.).

Одним из дискуссионных вопросов в настоящее время является вопрос о характере суточных вариаций параметров мезосферного натрия. Экспериментально показано, что на низких и средних широтах, например в Бразилии, преобладают колебания с полусуточными вариациями концентрации, обусловленные приливами. В Андое были обнаружены только суточные вариации. Примерно аналогичные результаты были получены и в Антарктиде на японской станции (69° юж. ш.). Это связывалось, главным образом, с затуханием или, возможно, полным отсутствием приливных полусуточных изменений в мезосфере высоких широт.

По наблюдениям на о. Хейса ($80^\circ 37'$ с. ш.) основной является полусуточная вариация концентрации, которая обусловлена не приливными колебаниями, а эффектами геомагнитной активности. Если разделить всю совокупность среднечасовых значений каких-либо наблюдаемых параметров мезосферного натрия на две группы, соответствующие низкой, например $A_p < 10$, и высокой $A_p > 10$ геомагнитной активности, то обнаруживаются полусуточные вариации, причем более ярко проявляются эти вариации при высокой геомагнитной активности. Это обстоятельство иллюстрируется на рис. 3, где представлены среднечасовые значения содержания натрия в столбе, рассчитанные по всему объему данных в зависимости от времени суток для двух указанных уровней геомагнитной активности. Еще ярче этот эффект проявляется в суточных вариациях высоты максимума слоя.

Наличие ярко выраженных полусуточных вариаций, в отличие от суточных вариаций, наблюдаемых в Андое, на ст. Молодежная объясняется особенностями суточного изменения положения пункта наблюдения относительно аврорального овала. На острове Хейса

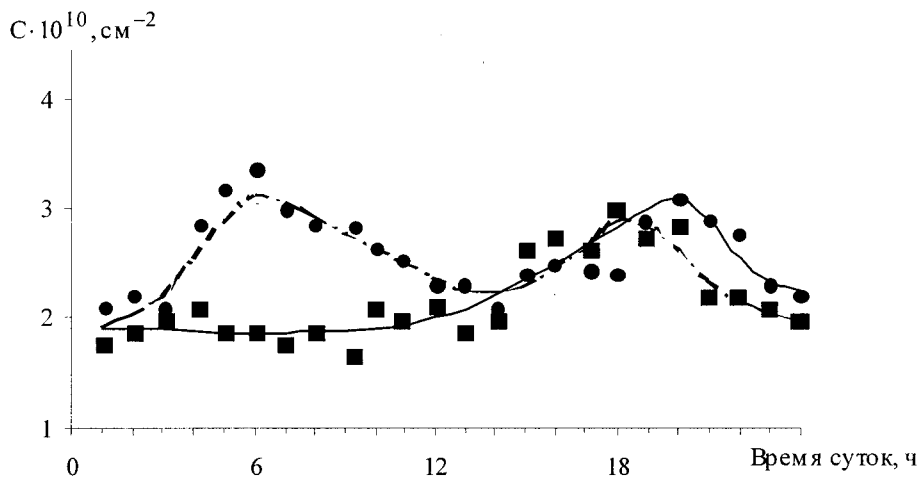


Рис. 3

■ — $A_p \leq 10$ ● — $A_p > 10$

точка наблюдения дважды в сутки проходит под овалом в утреннем и вечернем секторах. В то время как положение других высокоширотных станций такое, что при наблюдениях они лишь один раз в сутки находятся в ночном секторе аврорального овала.

Таким образом, суточные изменения в большей степени определяются геомагнитной активностью. Эта зависимость носит сложный характер, так как геометрия самого овала меняется от геомагнитной активности.

В соответствии с национальной программой Украины были начаты комплексные исследования средней атмосферы лидаром в мае 1979 г. на антарктической станции Молодежная в составе 24 САЭ. Впервые в мировой практике начаты эксперименты по резонансному лазерному зондированию мезосферы южнополярной области [22]. Целью исследований было установление возможностей проведения уникального оптико-лазерного эксперимента аппаратуры оригинальной разработки в сложных климатических условиях Антарктики. Лидарный комплекс был смонтирован в подвижном кунге с оптическим обогреваемым иллюминатором диаметром 100 см. Регистрация сигналов производилась на специально разработанном дисплее, с экрана которого проводилась фоторегистрация результатов накопления фотоэлектронов сигналов резонансно рассеянных слоев натрия. По энергетическим и другим техническим данным разработанный лидарный комплекс и до настоящего времени соответствует уровню лучших образцов аналогичной зарубежной техники. В условиях сложной ветровой нагрузки воздействия стоковых ветров вибрации кунга не оказывали ограничений на работу оптико-электронной аппаратуры.

Результаты проведенных экспериментов показали, что над Антарктидой существует слой натрия со средней высотой 88 ± 2 км. Огибающая слоя была не симметрична с большей скоростью нарастания концентрации в нижней его части и меньшей скоростью спада – в верхней части. Вариации концентрации натрия в столбе коррелировали при аномальных наблюдениях с ростом притока вещества радиометеоров одновременно регистрировавшихся на ст. Молодежной [21]. Средняя концентрация в зимний период изменялась в диапазоне $5 \cdot 10^9 \dots 1 \cdot 10^{10}$ [26].

Наблюдаемое высотное распределение слоя натрия в нижней его части соответствует 3...5 км, что указывает на влияние турбулентной диффузии, оценки которой показали, что величина ее не противоречит среднеширотным значениям. Особенностью высотного распределения является спорадические слои концентрации шириной менее 1 км, превышающие в несколько раз объемную концентрацию в максимуме слоя (рис. 4).

Отмеченная периодическая модуляция слоя по концентрации позволила выявить методом фильтрации ВГВ с длинами волн: 12; 8; 6; 4; 2.8 км. Измеренные скорости движения фаз волн лежали в диапазоне 0,6...3 км/ч. Преимущественное направление движения фазового фронта такое же, как в Арктике. Редко отмечались

обратные движения, что возможно обязано энергии электроджета, возникающего в верхней атмосфере Антарктики.

4. Среднеширотный мониторинг динамики слоя натрия в районе Туапсе и Ашхабада

Изучение параметров натриевого слоя получены на основе регулярных измерений резонансного рассеяния мезосферного натрия, которые были проведены в Туапсе и Ашхабаде с целью исследования динамики слоя, в том числе волновых возмущений атмосферы в диапазоне высот от 80 до 100 км.

Результаты наблюдений, представленные в настоящей статье, охватывают период с апреля 1989 г. по март 1990 г. и включают 32 ночи наблюдений в Туапсе. В течение каждой ночи проводилось 5–6 сеансов измерений, длительностью 30...50 мин каждый. В результате зондирования натрия под Туапсе от одиночных зондирующих импульсов и при их накоплении часто наблюдались волнообразные возмущения профилей, обусловленные распространением ВГВ в мезосфере. В таких случаях форма сигнала была искажена и иногда содержала два-три максимума (рис. 4). Сравнительно редко профили имели гладкую, почти идеальную форму, напоминающую гауссовское распределение.

Накопление сигнала составляло $(1-3) \cdot 10^4$ фотоэлектронов от слоя натрия за сеанс в зависимости от прозрачности атмосферы и общего содержания натрия в вертикальном столбе. Уровень фона ночного неба и собственные шумы ФЭУ измерялись между зондами и вычитались перед обработкой. Отношение полезного сигнала к уровню фона и собственных шумов обычно составляло от 100 до 200 в максимуме слоя.

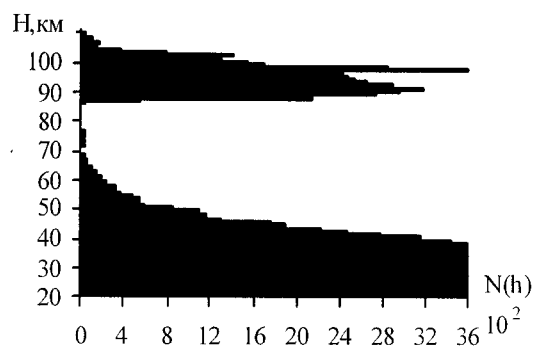


Рис.4

Параметры слоя (концентрация натрия в столбе, высота и среднеквадратичная ширина слоя) определялись через пространственные моменты профиля концентрации.

Концентрация примеси в вертикальном столбе совпадает с нулевым пространственным моментом профиля: $C_s = M_0$. Высота (z_s) и среднеквадратичная ширина слоя (y_s) вычислялись из следующих соотношений соответственно:

$$z_s = M_1/M_0, \quad \sigma_s^2 = (M_2/M_0) - (M_1/M_0)^2. \quad (4)$$

На рис. 5а, б, в представлены сезонный ход концентрации натрия в столбе C_s , сезонные зависимости y_s и z_s .

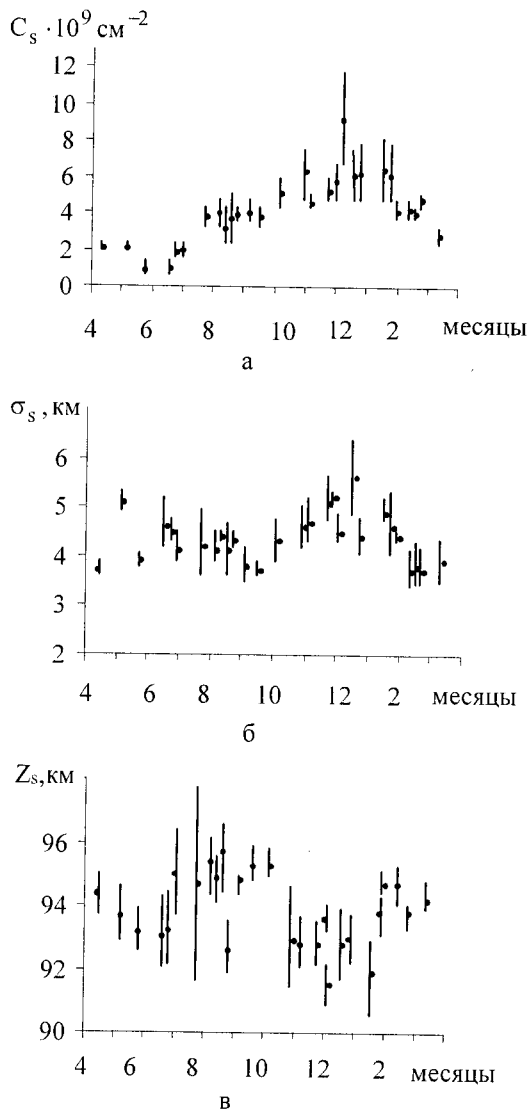


Рис. 5

При наземных исследованиях (например, в Ашхабаде, Туапсе) относительная статистическая погрешность измерений натрия в столбе не превышает 1%. Калибровка сигналов производится по сигналам молекулярного рассеяния, принятого с высот 30...40 км, что обеспечивает точность на уровне 15...20% из-за вариаций плотности атмосферы на этих широтах. Среднеквадратичные погрешности оценок высоты и ширины слоя не превышают 0,2 км.

Следует отметить, что существенное повышение высоты слоя z_s до 95...96 км наблюдалось в июне-декабре 1989 г. (рис. 5, в). Ширина слоя в это время изменялась в пределах 4,0–4,7 км. Понижение высоты слоя наблюдалось в середине зимы до 92...93 км и сопровождалось увеличением его ширины до 5,0...5,5 км. Эти особенности совпадали с сезонным повышением концентрации натрия в столбе. Необычное относительное изменение концентрации натрия в столбе наблюдалось в течение трех ночей августа 1989 года. В качестве примера можно отметить, что эти изменения достига-

ли $\pm 25...35\%$. Это, вероятно, обязано частично приливным эффектам в атмосфере и вариациям притока метеорного вещества в отмеченный период.

В 1987 г. 19 июля в период с 21 ч до 23 ч местного времени над Туапсе наблюдался спорадический слой натрия, шириной менее 1 км на высоте 94 км (рис. 4), который напоминал слой, зафиксированный на ст. Андоя [27], а также наблюдавшийся в Иллинойсе [28]. Происхождение слоя связывают с электродинамическими процессами «сгонки ионов» в сдвиговом ветре и рекомбинацией последних.

Для описания невозмущенного волнами натриевого слоя используется гауссовская модель вертикального профиля концентрации, записываемая в следующем виде:

$$C(z) = (C_s / \sqrt{2\pi}\sigma_s) \exp[-(z-z_s)^2/2y_s^2]. \quad (5)$$

В процессе анализа оценивалась реакция профиля концентрации натриевого слоя на прохождение внутренней гравитационной волны. Результирующий профиль $C(R, T)$ зависит от формы невозмущенного слоя, (5) и параметров действующей на него волны $V(R, T)$

$$C(\dot{R}, T) = C_0 \{z - \gamma_n [1 + V(\dot{R}, T)]\} / 1 + V(\dot{R}, T), \quad (6)$$

$$V(\dot{R}, T) = A \exp(\beta z) \cos(\omega T - k \dot{R}) / \gamma - 1, \quad (7)$$

где β – параметр роста амплитуды волны с высотой; γ, H – отношение удельных теплоемкостей газа и высота однородной атмосферы; k, R – волновой и координатный векторы соответственно.

Взаимодействие гравитационной волны с натриевым слоем, как следует из (6), имеет довольно сложный и нелинейный (при больших амплитудах волн) характер, что затрудняет определение параметров волн по измеренным профилям концентрации.

В то же время, амплитуды волн в большинстве случаев достаточно малы для линейной аппроксимации данного взаимодействия. Сравнительно простое приближенное соотношение получают путем разложения (6) в ряд Тейлора и аппроксимацией последнего линейными членами, которое имеет вид

$$C(\dot{R}, T) = C_0(z) - [C_0(z) + \gamma H dC_0(z)/dz] V(\dot{R}, T). \quad (8)$$

В результате анализа (6), (7), (8) отмечены следующие особенности реакции профиля концентрации слоя на волновое возмущение:

атмосферная гравитационная волна, согласно (6) действует одновременно как на амплитуду (мультипликативная составляющая), так и на аргумент (сдвиговая составляющая) профиля концентрации невозмущенного слоя;

волновое возмущение аргумента профиля соответствует вертикальному смещению атомов слоя под действием вертикальной составляющей ветра, возбуждаемого волной в атмосфере;

величина сдвиговых возмущений, обусловленных тем же вектором, возрастает с увеличением градиентов концентрации атомов на границах слоя;

мультипликативная составляющая смещена по фазе относительно сдвиговой на 90° , поэтому результирующее возбуждение профиля сильно зависит от локальных значений градиента концентрации атомов.

Таким образом, большие градиенты концентрации атомов натрия на границах слоя делают наблюдаемые волновые возмущения более выраженными.

Для выявления волн и определения их параметров по резонансному рассеянию натрия, согласно методики, описанной в [29], вычисляют пространственные спектры мощности регистрируемых профилей концентрации слоя.

Полученные спектры сравнивают с пространственным спектром невозмущенного натриевого слоя и принимают решение о наличии либо отсутствии волны в сигнале. Уверенное принятие решения о наличии волн можно производить при соотношении сигнал — шум не менее 5...10 дБ по мощности, что соответствует реальным накоплениям сигнала порядка 10^4 ... 10^5 фотоэлектронов от всего слоя за каждый сеанс измерений [30].

Для анализа волновой активности в области слоя натрия, полученной в Туапсе, высотные профили были разделены на десятиминутные интервалы по 100–110 зондирующим реализациям в каждом. При этом соотношение сигнал — помеха изменялось от 6,5...8,4. Всего было проведено 32 ночи наблюдений и получено 486 десятиминутных профилей сигналов резонансного рассеяния, т. е. примерно 15 профилей за каждую ночь наблюдения.

Нормированные профили резонансного сигнала, полученные в течение ночи, суммировались для оценки результирующего среднего профиля сигнала, на котором не отмечалось волновых возмущений. Суммарные профили обычно имели вид гауссовского распределения и вычитались в дальнейшей обработке из каждого десятиминутного профиля непосредственно перед процедурой обнаружения ВГВ. Таким образом вычиталась «постоянная составляющая» лидарного сигнала, т. е. исключалась из анализа.

Обнаружение ВГВ и достоверность принятия решения по обнаружению их не зависели от степени соответствия сигнала гауссовской модели. При заданной вероятности ложной тревоги $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ вероятность обнаружения волн составляла не менее 0,9.

Пространственная волна определялась по максимуму корреляционного интеграла в процессе перестройки опорного (образцового) сигнала по частоте. За счет накопления удавалось оценить точность измерения в 1,6% (при коэффициенте модуляции 0,03 и вертикальной волне в 5 км). При увеличении числа зарегистрированных профилей точность, естественно, повышалась. Однако в этом случае предполагалось условие постоянства вертикальной длины волны в процессе измерений, что не всегда выполнялось. Поэтому реальная точность измерений составляла 3...5%.

Период волны T_B рассчитывалось из соотношения

$$T_B = 2\pi(t_2 - t_1) / (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (9)$$

где φ и t — фазовый угол волны и заданный момент времени соответственно.

Скорость волны c_z оценивалась из соотношения

$$c_z = \lambda_z / T_B = 1 / f_n T_B, \quad (10)$$

где $f_n = 1 / \lambda_z$.

В процессе обработки всего материала было обнаружено 110 волновых событий за 3–4 часа наблюдений в течение каждой ночи. Лишь отдельные волны существовали всю ночь. Иногда волна исчезала и вновь появлялась с частично измененными параметрами. При этом существовали одновременно либо «пересекались» во времени не более двух-трех волн.

Наблюдались вертикальные длины волн, сезонное распределение которых изменялось в пределах от 2,3 до 38 км летом и от 2,6 до 32 км — зимой. При этом существенных сезонных отличий этих параметров отмечено не было.

Большинство волн (60 %) составили волны не короче 8 км и 33 % из них были с вертикальными длинами волн в диапазоне от 4 до 8 км.

Эффективная ширина пространственного спектра от невозмущенного волнами слоя реально составляла 0,05...0,07 км⁻¹. Двукратное увеличение диапазона вертикальных волн удалось получить благодаря оригинальному методу обработки сигналов. Предложенная методика расширяет потенциальные возможности резонансных лидарных систем также при измерении наиболее мощных гармоник атмосферных приливов.

Сезонное распределение периодов и ему соответствующая выборка частот ВГВ имеет границы, простирающиеся от 20 до 2200 мин летом и от 32 до 1700 мин зимой. Отличительной особенностью в этих измерениях является отсутствие волн с периодами в диапазоне 900...1500 мин в течение всего года.

Выборки собственных частот волн аналогичны по структуре гистограмме пространственных частот ВГВ. Более половины из них (58 %) имели период менее 255 мин и треть из них (34 %) — изменялись в диапазоне от 100...250 мин. В 26 % случаев зарегистрированы волны с периодами 500...900 мин, которые включали полусуточный прилив.

Эти результаты содержат и более высокочастотные моды приливных колебаний, для которых не удалось зафиксировать направление распространения.

В 20 % случаев фазы зафиксированных волн распространялись вверх, что соответствует движению волновой энергии в атмосфере — вниз. Остальная часть обязана источникам энергии, находящимся в нижних слоях атмосферы.

Диапазон изменения скоростей движения волн оказался примерно одинаковым и составлял диапазон от 0,25...1,8 м/с для лета и 0,27...1,4 м/с зимой. Однако, в октябре, ноябре и декабре 1989 г. интервал скоростей был несколько уже и находился в диапазоне 0,55...0,96 м/с, когда вертикальная фазовая скорость ВГВ изменялась в пределах 0,4...1,0 м/с.

Гистограмма выборки собственных частот волн (рис. 6) имеет лишь один максимум вблизи $0,6...0,7$ м/с. При этом половина волн имели фазовые скорости, лежавшие в диапазоне $0,45...0,75$ м/с и 90 % их не выходили за пределы $0,3...1,1$ м/с.

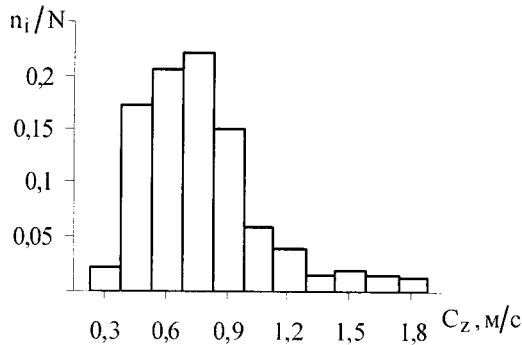


Рис. 6

Зависимость вертикальных длин волн от периода представлена на рис. 7 для зимних периодов измерений. Аналогичные данные отмечены и для летнего периода. Квадрат коэффициента корреляции в обоих случаях был близок к единице (0,89 и 0,91) соответственно).

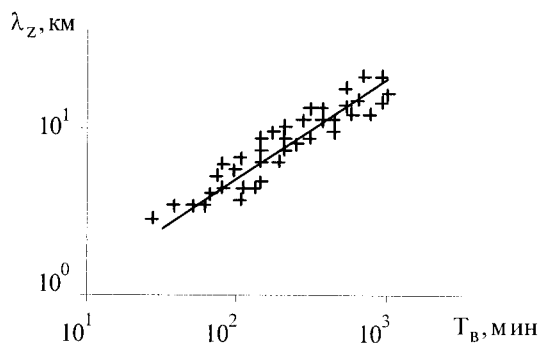


Рис. 7

Таким образом, была отмечена линейная связь вертикальных длин волн и периодов ВГВ. Волновая активность была повышена обычно в течение одного часа в утренний предрассветный период и несколько большей — в вечернее время после заката.

Гистограмма распределения времени существования волн условно является количественной оценкой волновой активности. Так, для региона Туапсе она составляет 0,8 и дважды в течение ночи она повышалась в 1,5 раза в 21 ч и 6 ч местного времени.

В период с 15–20 сентября 1985 года была проведена серия аэрономических экспериментов в пункте на 1000 км севернее Ашхабада, в частности по инъекции вещества в верхнюю атмосферу. В этот период был проведен лидарный мониторинг натрия на станции, расположенной в горах Копет-Дага (в астрономической обсерватории поселка Вановский).

Наиболее своеобразное поведение слоя натрия отмечено в период 15–16 сентября. В интервале 0,1–0,2 ч московского времени было отмечено увеличение концентрации натрия в максимуме слоя и его уширение. При этом расчетная концентрация натрия возрос-

ла вдвое по сравнению с фоновой для 23 ч. Аналогичные аномальные явления в атмосфере наблюдались в ночь с 17 на 18 сентября. Вариации приведенной высоты нижнего слоя натрия, а также и изоплеты концентрации натрия, отмеченные в этот период, указывают на значительные волновые возмущения мезосферы. Было отмечено несколько режимов, когда фаза волнового возмущения дважды менялась на обратную за ночь наблюдений. Волновой процесс с длиной волны 10 км наблюдался до 2 ч ночи и распространялся с вертикальной скоростью 1,1 км/ч (вверх). После 2 ч волна распространялась с такой же скоростью вниз. Волновые процессы с длиной волны 7 и 5 км в течение ночи несколько раз меняли направление движения фазы на противоположное. Были отмечены моменты с режимом стоячей волны, когда фаза длительный период не изменялась, а слой состоял из двух максимумов.

Изложенные факты указывают на то, что мезосфера является акустическим волноводом, в котором возбуждаются моды, кратные волне в 6, 7 и 8 км. Они могут возбуждаться за счет искусственных возмущений, распространяющихся на большие расстояния от их источников.

Мезосферный слой чрезвычайно чувствителен к различного рода возмущениям как естественного, так и антропогенного происхождения. В связи с этим большой интерес вызывают измерения вариаций содержания в верхней атмосфере лития и его изотопов [18, 31]. Фоновая концентрация этого элемента приблизительно на три порядка ниже, чем натрия, поэтому для обнаружения и исследования литиевого слоя необходимо было модернизировать лидарную аппаратуру, значительно усилив мощность передатчика и одновременно с этим снизив фоновую составляющую принимаемого излучения. Энергия излучателя Ашхабадской станции была увеличена за счет оптимального построения селективного резонатора и применения усилителя бегущей волны. В приемном устройстве был применен уникальный интерференционный фильтр с полосой пропускания около 0,1 нм в сочетании с охлаждением фотокатода ФЭУ до температуры порядка -30°C . Профиль сигнала обратного рассеяния, полученный в августе 1985 г. суммированием около 1000 световых импульсов, представлен на рис. 8. Рассчитанное значение концентрации в максимуме слоя равнялось приблизительно 2 атомам в кубическом сантиметре на высоте около 90 км.

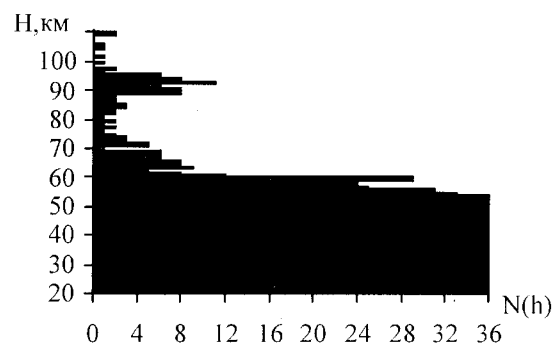


Рис. 8

30 марта 1981 года, когда происходило торможение спускаемого аппарата «Союз-33», по траектории, проходящей над районом Ашхабада, в страто-, мезосфере было зарегистрировано аномальное рассеяние лидарных сигналов на высотах от 45 до 100 км. Было отмечено, что наблюдается аномальное рассеяние натрия в области «серебристых облаков» (на 70 км), что, вероятно, обязано появлению продуктов испарения надстроек корабля при вхождении его в плотные слои атмосферы. Подобных явлений в страто-, мезосфере никогда ранее не наблюдалось.

5. Исследование широтной динамики концентрации натрия в высотном столбе

Анализ глобальных сезонных зависимостей концентрации натрия на многих станциях, включая данные, полученные по национальной сети Украины, показал, что отношение максимума зимней концентрации в столбе к летней имеет своеобразный ход по широте. Для о. Хейса это отношение составляет 8–10. В летний период при этом концентрация составляет $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Для ст. Молодежная отношение, в среднем, составляло 7 ± 2 . Для норвежской ст. Андоя, исландской ст. Свалорд (78° с. ш.) и для японской Антарктической станции в зимнее время на всех этих пунктах концентрация в столбе находилась в пределах $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Вопрос о летней дневной концентрации высокоширотного слоя на ст. Свалорд остается неопределенным, так как обнаруженная в период с 10–15 июля 1987 г. концентрация в столбе оказалась в 25 раз меньше, чем в осенний период. А концентрация в столбе 7–11 сентября оказалась равной $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ такой же, как на широте 78° с. ш. в пункте, который находился на 1000 км южнее ст. Свалорд.

Глобальные наблюдения широтных вариаций концентрации в столбе, выполненные в Атлантике с борта

НИС «Профессор Визе» в двух Антарктических рейсах в 1991–1992 годах, представлены на рис. 9. Эти результаты получены в феврале–марте 1991 г. и в январе–феврале 1992 г. в диапазоне широт $\pm 60^\circ$. Измерения проводились по ходу судна в ночное время. Каждая точка на графике представляет усредненное значение концентрации за полную ночь наблюдения. Разброс результатов, полученных при неизменных параметрах лидара, характеризует реальную картину изменчивости концентрации от одних суток к другим. Как видно из рис. 9, эти первые прямые измерения хорошо согласуются с известными данными, в том числе с наблюдениями, полученными в Антарктике и Арктике, а также данными для средних и низких широт обоих полушарий. Следует отметить, что значительный разброс данных на широте $\pm 60^\circ$ юж. ш., полученные в 1991 г., соответствует прохождению судна в районе Бразильской геомагнитной аномалии. При этом отмечается некоторая асимметрия широтного хода концентрации между южным и северным полушариями.

Заключение

Созданная усилиями ученых России и Украины система лидарных средств для резонансного зондирования примесей до настоящего времени продолжает оставаться эффективным средством контроля воздействия на околоземную воздушную среду, что может быть использовано для решения проблем экологии Черного моря.

При испытании различных космических средств, а также противоракетных технологий за счет трансграничного переноса примесей могут возникать вышефоновые воздействия, для контроля которых аналогичные средства могут успешно использоваться.

Совершенствование лидарных средств по зондированию основных и примесных составляющих атмос-

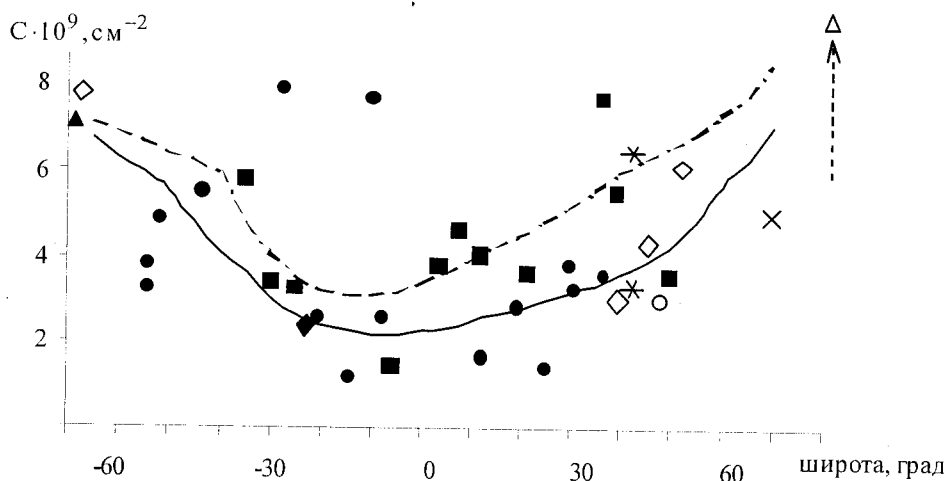


Рис. 9

- - Тулинов и др. (1991 г.) ■ - Тулинов и др. (1992 г.) Δ - Тулинов и др. (80 град. с.ш.)
- ◇ - Лагутин и др. (67 град. ю.ш., 38 град. с.ш., 43 град. с.ш., 50 град. с.ш.)
- ▲ - Номура (69 град. ю.ш.) ◆ - Клемеша (23 град. ю.ш.) ✖ - Гарднер (40 град. с.ш.)
- - Мэжи (44 град. с.ш.) × - Вон Зан (69 град. с.ш.)

феры важно для комплексирования их с национальными радиоэлектронными средствами некогерентного зондирования ионосферы.

Таким образом, лидарные средства остаются актуальными в интересах решения ряда глобальных проблем таких, как изменение климата, астероидная безопасность и другие фундаментальные и прикладные проблемы радиоэлектроники.

Литература: 1. *Лагутин М.Ф.* Лазерная резонансная локация в экологии космического пространства // Радиотехника. 1996. Вып. 100/96. С. 173–187. 2. *Лагутин М.Ф.* К вопросу о происхождении атомов металлов в нижней ионосфере Земли // Астр. вестник. 1974. Т. VIII. № 3. С. 145–153. 3. *Vowtan M.R., Gibson A.I., Sandford M.C.W.* Sodium measured by a tuned laser radar // Nature. 1969. V 221. № 1. P. 456. 4. *Magie G., Blamon I.E.* Laser sounding of atmospheric sodium: interpretation in terms of global atmospheric parameters // Planet. Space Sci. 1977. V. 25. P. 1093–1109. 5. *Тулинов Г.Ф., Дудолодов Ю.П.* и др. Измерение температуры верхней атмосферы в Атлантике на НИС «Профессор Зубов» с помощью рэлеевского лидара // XI Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере (тезисы докладов). Томск. 1991. с. 161. 6. *Возможности аппаратуры и методика лазерного зондирования атмосферы на Антарктической станции / Лагутин М.Ф., Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Мустецов Н.П.* // Тезисы докладов 5-го Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск. 1978. Ч. 2. С. 21–22. 7. *Алексеев В.А.* Стабилизация излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой. М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. 44 с. (Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. Вып. 11 (1584)). 8. *Beenen G.J., Lessard B.P., Piepmeyer E.H.* Laser-induced impedance changes in hollow cathode lamps // Anal. Chem. 1979. V 51. № 11. P. 1721–1724. 9. *Lidar sounding in M-zone / Ovezgeldyev O., Lagutin M. F., Kyrbunmuradov K., Melnikov V.J., Zarudny A.A.* // Handbook for MAP. 1987. V 23. P. 405–409. 10. *Equipment and results of the mesospheric sodium layer investigations in Touapse / Lagutin M.F., Zarudny A.A., Verchorobin A.L. et al.* // Abstract of papers of the Fifteenth International Laser Radar Conference. Tomsk. 1990. Part 1. P. 135–139. 11. *Влияние нестабильности излучения перестраиваемого лазера на результаты измерений / Лагутин М.Ф., Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л.* // Труды 10 Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск. 1989. Ч. 1. С. 256–260. 12. *Безлепкин А.И., Хомяк А.С., Александров В.В.* Спектральные источники света для атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: ЦНИИ «Электроника», 1981. 45 с. (Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника; Вып. 4 (758)). 13. *Wavelength stabilization and control of emission of pulsed dye lasers by means of a multibeam Fizeau interferometer / Cahen C., Jegou J.P., Pelon J. et al.* // Revue Phys. Appl. 1981. V 16. P. 353–358. 14. *Волков С.Ю., Пелупенко А.М.* Автоматизированный измеритель длин волн лазерного излучения на основе интерферометров Физо // Квант. электроника. 1982. Т. 9. № 3. С. 343–344. 15. *Ваняшина Е.В., Васильева Л.А., Вето А.В.* Малогабаритные матричные ПЗС-формирователи видеосигналов серии КБ1201ЦП // Электр. промышленность. 1981. Вып. 9. С. 3–4. 16. *Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф.* Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 83–89. 17. *Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л.* Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы // Радиотехника. 1998. Вып. 102. С. 170–175. 18. *Зарудный А.А.* Исследования фонового содержания лития в атмосфере резонансным лидаром // Международная конференция «Теория и техника передачи, приема и обра-

ботки информации». Тезисы докладов. Харьков-Туапсе. 1995. С. 86. 19. *Тулинов Г.Ф., Дудолодов Ю.П., Иванов М.С.* и др. Лазерное зондирование верхней атмосферы Центральной Арктики // ДАН СССР. 1976. С. 121. 20. *Chanin M.L., Tulinov G.F., Dudoladov Y.P. et al.* Lidar sounding of mesospheric sodium in the Central Arctic // Adv. Space. Res. 1990. V 10, № 10. P. 10071. 21. Численность метеоров по радиолокационным наблюдениям в Антарктиде / Катаев Л.А., Лагутин М.Ф., Лысенко И.А., Петручек Г.П. // Астроном. вестник АН СССР. 1970. Т. IV. № 3. С. 204–206. 22. Лазерное зондирование атмосферы на антарктической станции Молодежная / Лагутин М.Ф., Мегель Ю.Е., Зарудный А.А. и др. // ДАН СССР. – 1981. – Т. 258. № 2. – С. 334–335. 23. *Тулинов Г.Ф., Дудолодов Ю.П., Иванов М.С.* и др. Техника и результаты лазерного зондирования верхней атмосферы полярной области // Ионосферные исследования. 1982. № 32. С. 104. 24. *Дудолодов Ю.П., Зиновьев К.Л., Иванов М.С.* и др. О вариациях общего содержания натрия в мезосфере Центральной Арктики // Ионосферные исследования. 1989. № 47. С. 137. 25. *Лагутин М.Ф., Андрущенко О.И., Бабенко А.А.* Влияние метеорного притока на высотное распределение натрия в верхней атмосфере // Изв. АН СССР (сер. физ.-техн., хим. и геолог. наук). 1976. № 6. С. 61–68. 26. Сезонные вариации атмосферного натрия в Антарктиде / Лагутин М.Ф., Мегель Ю.Е., Зарудный А.А., Рыбалка А.И. // Бюл. САЭ. – 1987. – № 110. – С. 56–61. 27. *Von Zahn U., Von Gathen P., Hansen G.* Forced release of sodium from upper atmospheric dust particles // Geophys. Res. Lett. 1987. V 14. № 1. P. 76–79. 28. *Beatty T.J. et al.* Cedar lidar of sporadic Na at Urbana, Illinois. Geophys. Res. Lett. 1988. V 15. № 10. P. 1137–1140. 29. *Gardner C.S., Voelz D.G.* Lidar Studies of the Nighttime Sodium Layer Over Urbana, Illinois. 2. Gravity Waves // J. Geophys. Res., 1987. vol. 92. № A5. P. 4673–94. 30. Результаты экспериментальных исследований динамики параметров натриевого слоя / Верхоробин В.Л., Лагутин М.Ф., Зарудный А.А., Торжков В.П. // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6. № 5. С. 553–558. 31. *Lidar measurements of atmospheric lithium / Jegou J.P., Chanin M.L., Megie G., Blamon J.E.* // Geophys. Res. Letters. 1980. – V. 7. № 11. – P. 995–997.

Поступила в редколлегию 14.11.02 г.



Лагутин Михаил Федорович, докт. техн. наук, проф. каф. РЭУ ХНУРЭ. Область научных интересов: прикладная геофизика, медицинская электроника.



Зарудный Александр Андреевич, канд. техн. наук, доц. каф. РЭУ ХНУРЭ. Область научных интересов: прикладная геофизика, лазеры и оптоэлектроника.

Тулинов Георгий Филиппович, докт. физ.-мат. наук, институт прикладной геофизики им. акад. Федорова Е.К., Россия. Область научных интересов: прикладная геофизика.

Кузьменко Владимир Иванович, канд. физ.-мат. наук, институт прикладной геофизики им. акад. Федорова Е.К., Россия. Область научных интересов: прикладная геофизика.