

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

Ю.Ф. КУТАЕВ, С.К. МАНКЕВИЧ,
О.Ю. НОСАЧ, Е.П. ОРЛОВ

34

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕХОДА
АТОМАРНОГО ЙОДА ДЛЯ ПОИСКА СИГНАЛОВ
ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ**

МОСКВА 2006

АННОТАЦИЯ

Предложено осуществлять поиск сигналов внеземных цивилизаций (ВЦ) на длине волны $\lambda = 1,315$ мкм лазерного перехода $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ атомарного йода. Перспективность поиска на этой длине волны обусловлена тем, что для нее на базе йодного фотодиссоционного квантового усилителя был создан узкополосный активный квантовый фильтр (АКФ) с шириной полосы $\approx 0,01$ см⁻¹ и высоким коэффициентом усиления $> 10^6$, который позволяет реализовать выделение и прием слабых сигналов с квантовым пределом чувствительности на фоне излучения звезд. Длина волны $\lambda = 1,315$, на которой уже созданы мощные йодные лазеры с дифракционной расходимостью излучения, может служить естественным частотным репером для осуществления связи с ВЦ. Использование йодного лазера, излучающего импульсы длительностью 10 нс с энергией 1 кДж (в настоящее время хорошо освоенный технический уровень), и АКФ в приемном устройстве обеспечит при диаметрах главных зеркал передающего и принимающего телескопов 10 м, расположенных в космосе, передачу и прием сигналов по всей небесной сфере независимо от направления на центр Галактики при расстоянии до ВЦ 300 св. лет. Малое поглощение излучения с $\lambda = 1,315$ мкм в атмосфере Земли ($\approx 2 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹) дает возможность вести поиск и передачу сигналов ВЦ и с наземных оптических телескопов, оснащенных адаптивными оптическими системами, с уменьшением дальности связи всего на 20%. Например, с помощью 8,2-м телескопа VLT Европейской южной обсерватории на горе Параналь (Чили) можно обеспечить дальность связи 160 св.лет. Если же будут реализованы проекты телескопов с диаметром главного зеркала 30 м, то дальность связи при их наземном базировании и оснащении адаптивными оптическими системами составит 2200 св.лет, а при космическом базировании - 2700 св.лет.

ABSTRACT

The search for signals from the extraterrestrial intelligence (ETI) using the wavelength $\lambda = 1,315 \mu$ by the laser transition ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ of the atomic iodine is suggested. Such a search seems to be promising, since for this wavelength on the base of an iodine photodissociation quantum amplifier a narrow-band and a high gain active quantum filter (AQF) has been created (the line width $\approx 0,01 \text{ cm}^{-1}$ and the gain factor $> 10^6$), and this allows picking out and receiving weak signals against a background of star radiation with a quantum sensitivity limit. The wavelength of $\lambda = 1,315$ on which the powerful iodine lasers with the diffraction divergence of radiation were created may serve as a natural frequency reference point for communication with ETI. The employment of an iodine laser emitting pulses of 10 ns duration and the energy of 1kJ (today well mastered technical level) and AQF in the receiving device, if the transmitting and receiving telescopes, located in space, have the diameters of main mirrors equal to 10 m, can provide communication with ETI at a distance about 300 light years in all celestial sphere regardless of galaxy center direction. The low absorption of radiation at $\lambda = 1,315 \mu$ in the Earth atmosphere ($\approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$) gives also a chance to provide a search for signals from ETI and signal transmission for ETI from the land optical telescopes equipped with adaptive optical trains, with a decrease of communication distance of 20% only. For example, using a 8.2-m telescope VLT of European South observatory on mountain Paranal (Chile) one can provide the operating distance of 160 light years. If the projects on the creation of telescopes with the main mirror diameter of 30 meters will be realized, then the operating distance, when the telescopes are ground-based and supplied with adaptive optical trains, will be 2200 light years, and for cosmic-based telescopes, 2700 light years.

1. Введение

В пионерских работах Коккони, Моррисона [1], Дрейка [2] и Шварца, Таунса [3] показана принципиальная возможность осуществления космической связи с внеземными цивилизациями (ВЦ) с помощью электромагнитных волн. За прошедшее с этих первых работ время наука и техника далеко ушли вперед, появился ряд теоретических и экспериментальных исследований в области поиска сигналов ВЦ [4-6], однако до настоящего времени достоверно зарегистрировать сигналы от ВЦ не удалось. В то же время по мере развития современного научно-технического прогресса актуальность и ценность обнаружения сигналов ВЦ и установления космической связи с ними возрастает.

Предлагаемая работа имеет своей целью осветить некоторые новые возможности решения указанной проблемы, появившиеся в связи с развитием и совершенствованием лазерной техники. Проблема поиска сигналов ВЦ в оптическом и ИК-диапазонах обсуждалась уже в первых работах [2,7,8]. В них было показано, что поиск сигналов ВЦ целесообразно вести не только в диапазоне СВЧ колебаний с длинами волн $\lambda = 1 \div 30$ см, но также в диапазоне видимых и ближних ИК волн с $\lambda = 0,5 \div 10$ мкм, несмотря на существенно больший уровень шума по сравнению с СВЧ диапазоном. Позже возможность поиска сигналов ВЦ в оптическом диапазоне обсуждалась в [9]. Обзор экспериментальных исследований по поиску сигналов ВЦ в радио и оптическом диапазонах можно найти в [10].

Главные достоинства оптического и ИК каналов - их высокая информационная пропускная способность и возможность осуществления остронаправленной передачи. Это позволяет передавать сигналы на огромные космические расстояния при разумных затратах энергии и размерах апертуры передающего устройства. Для регистрации сигналов ВЦ, как отмечают Шварц и Таунс в конце своей статьи [2], «...вероятно, будет правильно изучить спектры звезд с высоким разрешением с целью поиска необычных узких линий, расположенных на необычных частотах или с переменной интенсивностью».

В данной работе обосновывается возможность эффективного поиска сигналов ВЦ и установления с ними космической связи на частоте такой «необычной» линии, узкой и жестко фиксированной в спектре, как линия лазерного перехода

$^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ атомарного йода - $\lambda = 1,315$ мкм.

2. Основные задачи, сопряженные с проблемой поиска сигналов и установления связи с ВЦ

Проблема поиска сигналов и установления связи с ВЦ сопряжена со следующими принципиальными техническими задачами, без решения которых эта проблема не может рассматриваться как реальная.

1. Выбор длин волн излучения, на которых целесообразно осуществлять поиск сигналов ВЦ.
2. Разработка методов выделения сигнала на фоне звезды, вокруг которой вращается планета с предполагаемой внеземной цивилизацией.
3. Обеспечение необходимой чувствительности приема сигнала с отношением сигнал/шум, обеспечивающим его уверенное обнаружение с вероятностью $\geq 0,9$ и достоверную идентификацию параметров сигнала на фоне шумов.
4. Обеспечение достаточного энергетического уровня передаваемого сигнала.

В связи с первой задачей авторы [2] отмечали, что в коротковолновом диапазоне «выбор частоты, вероятно, будет диктоваться наличием подходящего вещества для лазера, обеспечивающего желаемую частоту».

Принципиальная возможность решения последних трех задач средствами лазерной техники проанализирована в [2], а также в [7,8]. При анализе предполагалось, что в передающем устройстве будут использованы мощные лазеры с дифракционной направленностью излучения, а в приемном устройстве для выделения полезного сигнала на фоне звезды – узкополосные фильтры практически не поглощающие излучение полезного сигнала и детекторы фотонов со 100% квантовым выходом для обеспечения максимально возможной чувствительности приема. Приемные и передающие устройства с такими, идеальными, характеристиками в шестидесятые годы прошлого века еще не были реализованы.

К настоящему времени в лазерной технике на длине волны 1,315 мкм разработано приемное устройство с узкополосным йодным активным квантовым фильтром (АКФ) [11-23], обладающее практически идеальными характеристиками и мощные йодные лазерные генераторы с дифракционной расходимостью излучения [25-34].

На основе приемного устройства с йодным АКФ можно успешно решить вторую и третью из упомянутых выше задач космической связи в отношении поиска сигналов ВЦ. Использование же в передающем устройстве мощных лазеров на атомарном йоде с дифракционной расходимостью излучения позволяет решить четвертую

из упомянутых задач, что в совокупности решает также задачу выбора длины волны излучения, на которой целесообразно осуществлять поиск сигналов ВЦ и открывает реальную возможность установления связи с ВЦ на расстояниях сотни и тысячи световых лет.

Отметим, что цикл работ «Физические процессы в фотодиссоционных лазерах», включающий в себя и работы по созданию йодного АКФ и мощных йодных фотодиссоционных лазеров с дифракционной расходимостью излучения, отмечен в 2003 году премией РАН им. Л.И.Мандельштама.

3. Характеристики йодного активного квантового фильтра

Йодный АКФ был создан на основе йодного фотодиссоционного лазера, излучающего и усиливающего электромагнитные волны с длиной волны $\lambda = 1,315$ мкм на лазерном переходе атомарного йода ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ [24].

Атомы йода в состоянии ${}^2P_{1/2}$ образуются в результате фотолиза перфторалкилйодида, типа C_3F_7I , под действием УФ излучения импульсных ксеноновых ламп. Перейдя в нижнее состояние ${}^2P_{3/2}$ атомы йода рекомбинируют в исходную молекулу за время много меньшее времени жизни возбужденных атомов.

Принципиальной особенностью активного квантового фильтра в отличие от пассивных оптических фильтров является то, что выделение сигнала осуществляется путем усиления узкой спектральной линии, содержащей сигнал. Причем, если показатель усиления много больше экстинкции, то потерь полезного сигнала нет.

Возможность использования йодного фотодиссоционного оптического усилителя в качестве активного квантового фильтра для приёма предельно слабых сигналов на фоне мощной засветки обусловлена следующими характерными особенностями активной среды йодных фотодиссоционных лазеров:

- ◆ жёстко фиксированная по положению в спектре узкая линия усиления (на половине высоты максимума ширина линии $\Delta\nu$ при коэффициенте усиления близком к единице составляет $0,01 \text{ см}^{-1}$ (при увеличении коэффициента усиления ширина линии уменьшается);
- ◆ большой показатель усиления $> 0,1 \text{ см}^{-1}$ и малый показатель поглощения $< 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ в активной среде лазера;

- ◆ большое реальное время жизни возбуждённых атомов йода - сотни микросекунд;
- ◆ высокая оптическая однородность активной среды;
- ◆ отсутствие атомов йода на нижнем уровне лазерного перехода.

Эти особенности активной среды делают целесообразным использование йодного АКФ для задач поиска сигналов ВЦ. Рассмотрим эти качества более подробно с привлечением результатов экспериментальных исследований.

Показатель усиления $> 0,1 \text{ см}^{-1}$ позволяет при длинах активной среды АКФ меньше метра достичь коэффициента усиления сигнала $\geq 10^6$ [14,18], что во много раз больше значения, при котором квантовый шум АКФ превышает дробовой и тепловой шум фотодиодов и элементов электрических цепей. При этом экспериментально регистрируется лишь квантовый шум АКФ.

Благодаря быстрому опустошению нижнего энергетического уровня и практически полному отсутствию на нем атомов йода вследствие быстрой их рекомбинации в исходную молекулу шум АКФ составляет минимально возможное значение. В силу же достигнутой высокой оптической однородности активной среды АКФ сигнал, исходящий из точечного источника, после усиления в АКФ удастся сфокусировать в пятно дифракционного размера [15], то есть реализуется одномодовый режим усиления, что позволяет достичь предельно высокой чувствительности, ограниченной квантовым пределом 1 фотон в моду за время $1/c\Delta\nu$.

Внешний вид йодного АКФ показан на рис.1. В [14] при отношении сигнал/шум единица экспериментально была достигнута чувствительность, равная примерно 3 фотонам, что обусловлено несогласованностью с шириной линии усиления АКФ длительности полезного сигнала и времени усреднения видеоусилителя, составлявшими на полувывоте от максимума соответственно 40 нс и 90 нс. Если согласовать длительность импульса полезного сигнала с шириной линии усиления АКФ, то есть сократить длительность импульса примерно до 10 нс, и использовать достаточно широкополосный видеоусилитель, то чувствительность АКФ при отношении сигнал/шум равном 1 составит примерно 1 фотон в моду.



Рис.1. Внешний вид йодного АКФ, разработанного в Отделении Квантовой радиофизики им. Н.Г.Басова Физического института им. П.Н.Лебедева РАН.

Высокий коэффициент усиления сигнала в сочетании с весьма узкой линией усиления приводит к тому, что при приеме импульсов согласованных по спектру с частотной характеристикой приемного устройства чувствительность приемного устройства с АКФ остается практически неизменной даже при наблюдении сигнала на фоне фактически любого мощного источника света естественного происхождения. Так, если прием сигнала вести на фоне диска Солнца, температура поверхности которого 6000 К, то чувствительность снизится всего на 12% [16,17].

Это утверждение было проверено в модельных экспериментах по приему сигнала на фоне плазменного источника излучения (источник Подмошенского ИСИ-1) с яркостной температурой 40000 К [18]. На рис.2, взятом из [18], представлена осциллограмма напряжения на выходе электронного усилителя при подаче на подключенный к нему фотодиод импульсного оптического сигнала с длительностью на полувысоте 40 нс на фоне импульса излучения ИСИ-1 (эффективное время усреднения электронного видеоусилителя $\tau_e = 90$ нс). В [18] при отношении сигнал/шум

равном 1 также как и в [14] достигнута чувствительность приема 3 фотона вне импульса ИСИ-1 и 6 фотонов в пределах импульса ИСИ-1.

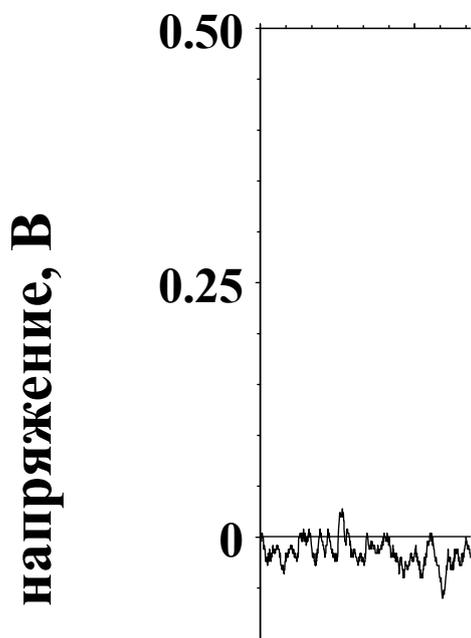


Рис.2. Осциллограмма напряжения на выходе электронного усилителя при подаче на фотодиод импульсного оптического сигнала и излучения ИСИ-1 с выхода АКФ (время усреднения $\tau_e = 90$ нс). Импульс излучения ИСИ-1 начинается на 8-ой мкс от начала отсчета времени сразу после высокочастотной электрической наводки от импульса поджига. Импульс полезного сигнала приходит на 13-ой мкс.

Таким образом, использование для приема оптических сигналов ВЦ йодного АКФ позволит решить задачу эффективного выделения оптических сигналов, состоящих всего из нескольких фотонов, на фоне излучения звезды. Следовательно,

можно утверждать, что йодный АКФ обеспечивает успешное решение в ИК-диапазоне длин волн второй и третьей из указанных задач космической связи.

Способы приема и обработки слабых импульсных лазерных сигналов в системах использующих йодный АКФ, апробированы и защищены патентами [13, 19-23].

4. Характеристики лазеров на атомарном йоде

Обсудим теперь возможность обеспечения достаточного энергетического уровня передаваемого сигнала для осуществления связи с ВЦ. Перечисленные в параграфе 3 характерные особенности активной среды и разработанные мощные источники накачки позволили к настоящему времени создать высокоэнергетические йодные фотодиссоционные лазеры с накачкой импульсными ксеноновыми лампами [25,26], сильноточными открытыми электрическими разрядами [26-28] и излучением сильных ударных волн, инициированных взрывами взрывчатых веществ [29-31]. Созданы также мощные кислородно-йодные лазеры как импульсно-периодические, так и непрерывного действия [32].

Так, например, лазеры, накачиваемые импульсными ксеноновыми лампами и сильноточными открытыми электрическими разрядами, излучают импульсы наносекундной и субнаносекундной длительности с энергией до нескольких десятков килоджоулей [33,34], а накачиваемые сильной ударной волной, инициированной взрывом взрывчатых веществ, излучают в импульсе длительностью несколько десятков микросекунд энергию мегаджоульного уровня [29, 31]. Кислородно-йодные лазеры непрерывного действия достигли мегаваттного уровня излучаемой мощности [32]. Работы по совершенствованию этих лазеров ведутся в настоящее время в различных научных центрах мира.

Достигнутая высокая оптическая однородность активной газовой среды йодного лазера в совокупности с применением методов обращения волнового фронта света, позволяет получать импульсы излучения дифракционного качества.

Таким образом, на длине волны $\lambda = 1,315$ мкм разработаны лазерные приемные устройства с предельно высокой чувствительностью и мощные высокоэнергетические лазеры с дифракционной направленностью генерируемого излучения. То есть, реализована весьма эффективная «пара» передатчик-приемник, обладающая огромным динамическим диапазоном по генерируемой мощности и энергии импульсов и предельными характеристиками, как по направленности генерируемого

излучения, так и по чувствительности приема. Вдобавок приемное устройство этой пары обладает также возможностью эффективного выделения принимаемого сигнала с длиной волны $\lambda = 1,315$ мкм, на фоне звезды практически без потери чувствительности.

Все эти полезные с точки зрения возможности осуществления связи между цивилизациями особенности активной среды лазеров на атомарном йоде обуславливают выбор для поставленной цели длины волны $\lambda = 1,315$ мкм, отвечающей переходу ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ атомарного йода, которая может служить естественным частотным репером для связи с ВЦ. Это решает первую из сформулированных выше задач в комплексе проблем связи с ВЦ, так как естественно предполагать, что указанные соображения и подход к решению задач космической связи доступны также и представителям предполагаемой ВЦ, находящейся, возможно, даже на более высоком уровне развития, чем наша земная цивилизация. В этом случае они также придут к выводу о целесообразности использования линии перехода ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ атомарного йода и используют длину волны $\lambda = 1,315$ мкм для излучения искусственных сигналов, направленных в сторону других цивилизаций.

5. Оценка дальности связи с внеземными цивилизациями с помощью йодных лазеров

Рассмотрим процесс передачи и приема сигналов при осуществлении лазерной космической связи с ВЦ по схеме приведенной на рис.3.

Пусть ВЦ, обитающая на планете 2, обращающейся вокруг некоторой звезды 1 по эллиптической траектории с большой полуосью орбиты a , излучает в сторону нашей солнечной системы импульсы лазерного излучения с энергией E на длине волны $\lambda = 1,315$ мкм, соответствующей рабочей длине волны йодного АКФ. В нашей солнечной системе на поверхности Земли или в космосе расположен приемный телескоп 3, наведенный на звезду 1 и фокусирующий принимаемые оптические сигналы на лазерное приемное устройство (ЛПУ) с йодным АКФ 4.

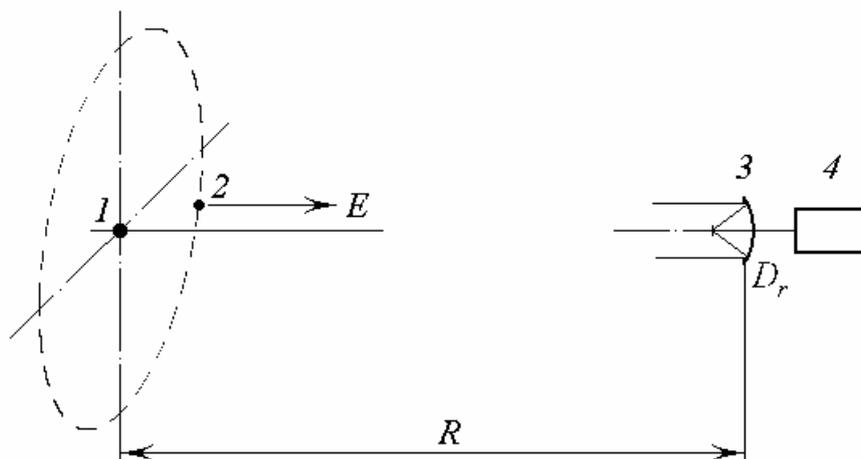


Рис.3. Схема передачи и приема сигналов при осуществлении лазерной космической связи между цивилизациями; звезда (1); планета (2); приемный телескоп (3); ЛПУ с АКФ (4). Штриховой линией изображена орбита планеты.

Принципиальная схема приемного устройства с АКФ представлена на рис.4. Оптический импульсный сигнал, посланный ВЦ, попадает на главное зеркало 1 приемного телескопа нашей цивилизации. Затем проходит сквозь АКФ 2 и оптической системой 3 фокусируется на фотоприемник 4, электрический сигнал с которого поступает в электронный видеоусилитель 5. С видеоусилителя информация поступает в блок обработки 6.

Расстояние R между звездой 1 и ЛПУ составляет, как минимум, несколько парсек ($1 \text{ пс} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ м}$; $1 \text{ св.год} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м}$). Рассмотрим случай, когда плоскость орбиты перпендикулярна направлению на приемник. Это наиболее благоприятный случай для оптического разрешения планеты и звезды. При расстоянии R более 20 парсек максимальный угол между излучателем, расположенным вблизи планеты 2, и звездой 1 $\vartheta = a/R$, наблюдаемый с места расположения ЛПУ, составляет величину $< 0,05''$, что практически исключает возможность оптического разрешения излучателя и звезды даже при диаметре главного зеркала приемного телескопа 10 м.

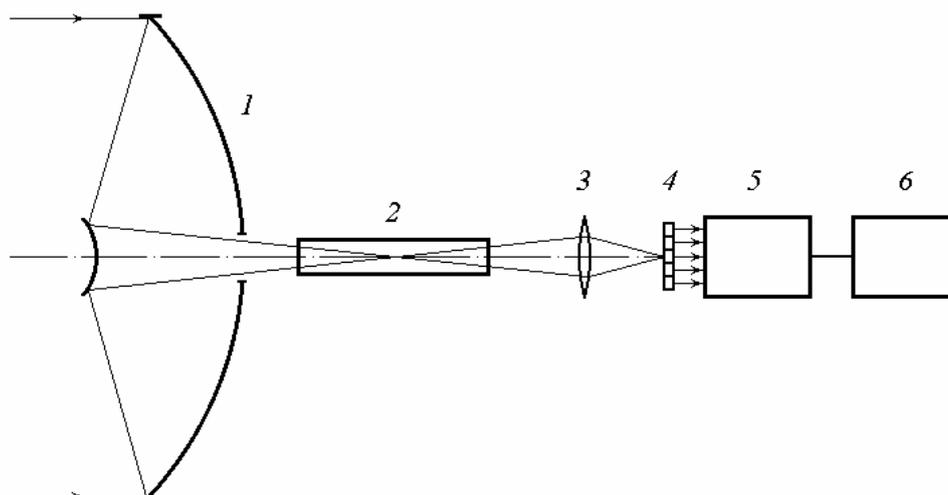


Рис.4. Принципиальная схема приемного устройства с АКФ: главное зеркало приемного телескопа (1); АКФ (2); фокусирующая линза (3); фотоприемник (4); видеоусилитель (5); блок обработки сигналов – персональный компьютер (ПК) (6).

Поэтому можно утверждать, что на фотоприемник поступает все излучение, пришедшее на апертуру приемного телескопа, как от излучателя ВЦ, так и от звезды. Следовательно, для выделения полезного сигнала на фоне излучения звезды необходима спектральная фильтрация, осуществляемая в АКФ.

Поскольку можно полагать, что вероятность возникновения жизни наиболее высока для одиночных звезд главной последовательности, принадлежащих спектральным классам, заключенным между классами F5 и K5 [35], поверхностная температура которых не сильно отличается от поверхностной температуры Солнца [36], а их излучение по своим яркостным свойствам близко излучению Солнца, то при приеме сигналов на фоне таких звезд чувствительность приемного устройства с йодным АКФ, как было отмечено выше, практически не изменится.

Лазерное передающее устройство, которое на данный момент может предложить наша цивилизация состоит из лазера, передающего телескопа и системы наведения. В данной работе для анализа эффективности космической связи между цивилизациями нет необходимости приводить принципиальную схему передающего устройства, поскольку такое устройство, в сущности, является простейшим астрономическим телескопом, в котором световые лучи идут в направлении обратном

тому, которое имеет место в приемном устройстве. Поэтому достаточно воспользоваться только такими понятиями как расходимость излучения лазера, диаметр главного зеркала передающего телескопа, диаграмма направленности зеркала.

Предположим, что передающее устройство ВЦ построено по такой же схеме, что и передающее устройство нашей цивилизации и вынесено за пределы атмосферы планеты ВЦ. Если полная энергия E , излучаемая передающим устройством, распределена по апертуре равномерно, то в случае круглой апертуры с диаметром D_t распределение энергетической яркости в дифракционной картине, как известно [37], описывается формулой Эйри

$$I(P) = \left(\frac{2J_1(kD_t \vartheta/2)}{kD_t \vartheta/2} \right)^2 I_0 = \left(\frac{2J_1(\pi D_t \vartheta/\lambda)}{\pi D_t \vartheta/\lambda} \right)^2 I_0, \quad (1)$$

где P - точка наблюдения, J_1 - функция Бесселя первого порядка, ϑ - угол между направлением в точку наблюдения и осью телескопа, $I_0 = ES_t/\lambda^2$ - энергетическая яркость в центре дифракционной картины, $S_t = \pi D_t^2/4$ - площадь апертуры передающего устройства.

Если приемное устройство также вынесено за пределы земной атмосферы и находится в центре дифракционной картины, то принимаемая энергия

$$E_r = \frac{I_0 S_r}{R^2} = \frac{S_t S_r}{\lambda^2 R^2} E = \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \frac{D_t^2 D_r^2}{\lambda^2 R^2} E, \quad (2)$$

где S_r - площадь апертуры приемного устройства (если она круглая, то

$S_r = \pi D_r^2/4$, где D_r - диаметр главного зеркала приемного телескопа); R - расстояние между передающим и приемным устройствами, которое фактически совпадает с расстоянием между звездой и приемным устройством.

Рассмотрим вначале процесс приема искусственного сигнала от излучателя (йодного лазера), посредством которого предполагаемая ВЦ ведет передачу в направлении нашей солнечной системы. Будем рассматривать моноимпульсный прием, при котором каждый импульс должен быть обнаружен и принят, тогда частота повторения импульсов для обнаружения значения не имеет. Будем также предполагать, что излучатель ВЦ посылает импульсы лазерного излучения дифракционно-го качества длительностью примерно 10 нс. Как уже упоминалось выше, импульсы

такой длительности по спектру оказываются хорошо согласованными с линией усиления йодного АКФ при коэффициенте усиления $K \approx 10^6$.

Здесь мы, не нарушая общности анализа, предположили, что, если уровень развития ВЦ таков, что ей известна рабочая длина волны йодного АКФ, то ей известна и оптимальная длительность импульса, принимаемого АКФ.

Для определения дальности, с которой на Земле может быть принят сигнал ВЦ, можно воспользоваться приведенной выше формулой (2), выполнив соответствующие преобразования. В результате получим

$$R = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E}{E_r}} \frac{D_t D_r}{\lambda}. \quad (7)$$

Для того чтобы вероятность обнаружения сигнала была более 0,9, что соответствует упомянутому ранее требованию надежного приема, энергия принимаемого сигнала должна быть втрое больше минимальной обнаружимой энергии, т.е. отношение сигнал/шум должно быть равно 3. Если эту энергию, представляющую собой чувствительность приемного устройства при заданном отношении сигнал/шум, выразить в количестве фотонов и обозначить как N_{\min} , то из условия $E_r \geq \varepsilon N_{\min}$, где $\varepsilon = hc/\lambda = 1,5 \cdot 10^{-19}$ Дж - энергия фотона с $\lambda = 1,315$ мкм, и формулы (7) получаем формулу для максимального расстояния, на котором надежно регистрируется сигнал, посланный передающим устройством

$$R = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E}{\varepsilon N_{\min}}} \frac{D_t D_r}{\lambda}. \quad (8)$$

Диаграмма направленности передающего устройства ВЦ должна быть такой, чтобы на расстоянии R луч перекрывал орбиту Земли. Исходя из этого условия, которое в математическом виде записывается как

$$R \frac{\lambda}{D_t} = 2\eta a, \quad (9)$$

где η - коэффициент перекрытия орбиты, с учетом (8) получаем, что диаметр приемного телескопа

$$D_r = \frac{8}{\pi} \eta a \sqrt{\frac{\varepsilon N_{\min}}{E}}. \quad (10)$$

Полагая $\eta > 1$; $a = 1$ а.е. = $1,5 \cdot 10^{11}$ м (размер большой полуоси земной орбиты); $N_{\min} = 3$, а энергию импульса 1 кДж, из формулы (10) для ЛПУ, расположенного на околоземной орбите, получаем $D_r > 8$ м. Поскольку телескопы с диаметром главного зеркала около 10 м уже созданы на Земле [38] положим $D_r = 10$. Диаметр главного зеркала передающего телескопа ВЦ D_t также положим равным 10 м.

Подставляя эти значения D_r и D_t в формулу (8) при указанных значениях N_{\min} , E и, учитывая, что она годится как для случая, когда сигналы посылает ВЦ, а мы их принимаем, так и для случая, когда сигналы посылаем мы, а принимает их ВЦ, приходим к выводу, что можно принять и послать надежно регистрируемый сигнал при расстоянии между цивилизациями 300 св.лет (≈ 100 парсек). В пределах сферы такого радиуса имеется примерно 10^5 звезд [6, С.49].

6. Обсуждение результатов

Из формулы (8) видно, что R увеличивается пропорционально произведению диаметров передающего и приемного телескопов и квадратному корню из энергии импульса. Отметим, что если чувствительность приемного устройства с йодным АКФ и расходимость излучения лазеров на атомарном йоде практически доведены до физического предела, то апертуры телескопов, а также энергию излучаемых импульсов можно существенно увеличивать. Так, например, имеются проекты 30 метровых оптических телескопов и даже 100 метровых [40-42]. Если обе цивилизации использовали бы телескопы с $D = 30$ м, то дальность связи при той же энергии импульсов возросла бы до 2700 св. лет. В сфере с таким радиусом содержится уже около 10^8 звезд [4, С.49] и более 200 обнаруженных к настоящему времени планет [43].

Приведенные оценки относятся к цивилизациям I типа по Кардашеву [39]. Сигналы от ВЦ, существенно превосходящих нашу цивилизацию по уровню развития и длительности существования техногенной эры, по-видимому, можно принимать с расстояний несоизмеримо больших.

Теперь сравним энергии импульсов, которые потребуются для осуществления связи с предполагаемой ВЦ на длине волны лазерного перехода атомарного йода $\lambda = 1,315$ мкм и на длине волны радиолинии водорода $\lambda_{\text{H}_2} = 21$ см. Будем полагать, что в обоих случаях спектры импульсов согласованы с частотными характеристиками приемных устройств.

В первом случае положим диаметр главного зеркала телескопа $D = 10$ м, а во втором диаметр радиотелескопа - 305 м. Такой диаметр у сферического зеркала самого крупного в мире радиотелескопа Аресибо. Используя формулу (8) и учитывая, что в радиодиапазоне чувствительность определяется фоном с температурой $T_N = 10$ К [6], а в ИК-диапазоне квантовым шумом, получим для отношения сравниваемых энергий при одинаковом отношении сигнал/шум

$$\frac{E}{E_{\text{H}_2}} = \frac{\varepsilon}{kT_N} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{H}_2}} \right)^2 \left(\frac{D_{\text{Аресибо}}}{D} \right)^4 \approx \frac{1}{27}. \quad (11)$$

Таким образом, при использовании йодных лазеров для передачи сигнала и йодного АКФ для его приема требуется энергия в 27 раз меньше, чем при использовании радиопередающих устройств на $\lambda_{\text{H}_2} = 21$. Если принять во внимание проекты оптических телескопов с $D = 30$ м, то это отношение становится равным примерно $1/2000$. Надо сказать, что площадь радиотелескопа Аресибо $0,73 \cdot 10^5$ м² достаточно близка к конструктивному пределу для наземных радиотелескопов. Для космических радиотелескопов, обращающихся по орбите вокруг Земли достижима площадь 10^5 м² [6], при этом отношение E/E_{H_2} будет равно примерно $1/1000$. В любом случае мы видим, что для связи на длине волны 1,315 мкм требуются импульсы излучения с меньшей энергией, чем для связи на длине волны 21 см. Кроме того уровень шума на $\lambda = 1,315$ мкм не зависит от ориентации оси приемного телескопа относительно направления на центр Галактики.

Отметим, что излучение с $\lambda = 1,315$ мкм практически не поглощается атмосферой Земли. Как показано в работе [44] показатель поглощения в приземном слое составляет примерно $2 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹. Поскольку он обусловлен парами воды, концентрация которых практически равна нулю на высотах больше 10 км, то при

прохождении земной атмосферы в вертикальном направлении потери энергии сигнала не будут превышать 20%.

Малое поглощение излучения с $\lambda = 1,315$ мкм в атмосфере Земли позволяет вести поиск и передачу сигналов ВЦ практически без уменьшения дальности связи и с наземных оптических телескопов, оснащенных адаптивными оптическими системами, способными в реальном времени компенсировать атмосферное размывание изображений. Например, на одном из 8,2-м телескопов VLT Европейской южной обсерватории на горе Параналь (Чили) размеры скорректированных изображений звезд на длине волны 1,2 мкм составили $0'',04$, что практически совпадает с теоретическим пределом для телескопа данного диаметра [40]. Если такие телескопы используются обеими цивилизациями, то с учетом указанного поглощения в атмосфере дальность связи между цивилизациями уменьшится всего на 20% и составит около 160 св.лет вместо 200 св.лет.

Если же будут реализованы проекты телескопов с диаметром главного зеркала 30 м, то дальность связи при их наземном базировании и оснащении адаптивными оптическими системами составит 2200 св.лет, а при космическом базировании - 2700 св.лет.

Таким образом, с помощью предлагаемого приемного устройства, установленного на каком-либо наземном астрономическом телескопе с достаточно большой апертурой, оснащенный адаптивной оптикой уже в настоящее время можно осуществлять поиск сигналов ВЦ, находящихся на таком же уровне развития как наша земная цивилизация, с расстояний около 160 св.лет. С помощью же передающего устройства, в котором в качестве излучателя используется лазер на атомарном йоде, с этими ВЦ может быть установлена связь.

Перечислим характерные особенности предлагаемого приемного устройства:

- 1) возможность острого нацеливания приемного телескопа на выбранную звезду с предполагаемой ВЦ;
- 2) возможность выноса ЛПУ с йодным АКФ в космос и стыковки его, например, с космическим телескопом имени Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) или с NGST (Next Generation Space Telescope), который находится сейчас в стадии разработки, и будет работать в инфракрасном участке спектра 0,6 – 28 мкм;

- 3) возможность уже в настоящее время начать поиск сигналов ВЦ, используя ЛПУ с йодным АКФ в крупногабаритных телескопах, оснащенных адаптивными оптическими системами.

Аналогичными характерными особенностями обладает и предлагаемое передающее устройство.

Поскольку на данный момент сигналы ВЦ на других длинах волн обнаружить еще не удалось на наш взгляд уже в настоящее время необходимо проанализировать целесообразность начала реализации программы по изучению с помощью АКФ излучения сначала ближайших к нам звезд, а затем и более удаленных звезд с целью поиска и обнаружения сигналов ВЦ. Можно считать, что появление импульсного или периодического сигнала в узком спектральном диапазоне на длине волны лазерного перехода атомарного йода, которого в естественном излучении звезды в столь узком спектральном диапазоне не должно быть ни при какой известной модели излучения звезды любого класса, будет свидетельствовать об его искусственном происхождении.

7. Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложено новое техническое средство для осуществления астрономических наблюдений окружающего Землю космического пространства с целью поиска сигналов внеземных цивилизаций (ВЦ). Этим средством является лазерное приемное устройство оптических импульсов излучения с $\lambda = 1,315$ мкм, основным элементом которого является созданный на базе йодного фотодиссоционного усилителя активный квантовый фильтр (АКФ) с шириной полосы $\approx 0,01$ см⁻¹ и коэффициентом усиления $> 10^6$. Такое приемное устройство позволяет реализовать выделение и прием слабых сигналов с квантовым пределом чувствительности на фоне излучения звезд и проводить поиск сигналов ВЦ по всей небесной сфере независимо от направления на центр Галактики.

Длина волны $\lambda = 1,315$ может служить естественным частотным репером для связи с ВЦ, поскольку на этой длине волны имеются мощные йодные лазеры с дифракционной расходимостью излучения, с помощью которых можно осуществлять посылку сигналов в направлениях звезд с подходящими для жизни планетными системами. Показано, что для связи между цивилизациями на длине волны 1,315

мкм энергия посылаемых импульсов может быть существенно меньше, чем на длине волны радиолинии водорода 21 см. Так, если используется 10 метровый оптический телескоп, то энергия импульсов, требуемая для связи на заданном расстоянии при одинаковом отношении сигнал/шум в 27 раз меньше, чем на длине волны 21 см при использовании самого крупного радиотелескопа Аресибо.

Проведены оценки расстояния, на котором можно осуществить связь с ВЦ по уровню развития аналогичной нашей цивилизации. Так для импульсов длительностью 10 наносекунд с энергией в каждом импульсе 1 кДж, что для йодных фотодиссоционных лазеров является уже технически освоенным уровнем, это расстояние при диаметре зеркал передающего и приемного устройств 10 м, вынесенных в космос, составляет не менее 300 св.лет,

Малое поглощение излучения с $\lambda = 1,315$ мкм в атмосфере Земли ($2 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹) позволяет вести поиск и передачу сигналов ВЦ и с наземных оптических телескопов, оснащенных адаптивными оптическими системами, с уменьшением дальности связи всего на 20%. Например, с помощью 8,2-м телескопа VLT Европейской южной обсерватории на горе Параналь (Чили) можно обеспечить дальность связи между цивилизациями 160 св.лет. Если же будут реализованы проекты телескопов с диаметром главного зеркала 30 м, то дальность связи при их наземном базировании и оснащении адаптивными оптическими системами составит 2200 св.лет, а при космическом базировании - 2700 св.лет. Энергия импульсов, требуемая для связи, при этом будет в 2000 раз меньше, чем на длине волны 21 см и диаметре антенны равной диаметру антенны радиотелескопа Аресибо.

Поскольку на данный момент сигналы ВЦ на других длинах волн обнаружить еще не удалось, то авторы считают необходимым и своевременным начать уже в настоящее время разработку и реализацию программы по изучению с помощью АКФ излучения сначала ближайших к нам звезд с подходящими для жизни планетными системами, а затем и более удаленных звезд с целью поиска и обнаружения сигналов ВЦ на длине волны $\lambda = 1,315$ мкм.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В.В. Рагульскому за интерес к работе, плодотворные обсуждения и полезную информацию по проблеме SETI.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коккони Дж., Моррисон Ф. «Поиски межзвездных сигналов» - В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.177-182. Cocconi G., Morrison P. – Nature, 1959, V.184. P. 844.
2. Дрейк Ф.Д. Как можно принять радиопередачи из отдаленных планетных систем? – В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.183-192. Drake F.D. Sky and Telescopes. 1959, V.19. P.140.
3. Шварц Р., Таунс К. Межзвездная и межпланетная связь при помощи оптических мазеров. – В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.247-256. Schwartz R.N., Townes C.H. – Nature. 1961. V.190. P.205.
4. «Внеземные цивилизации» - Тр.совещания, Бюракан, 20 - 23 мая 1964 г. Изд. АН Арм. ССР, 1965.
5. «Внеземные цивилизации» - Сб. под ред. С.А.Каплан. М.: Наука, 1969. 440 с.
6. Гиндилис Л.М. Поиск Внеземного Разума. Физматлит, 2004. 648 с.
7. Оливер Б. Некоторые возможности оптических мазеров. - В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.229-246.
8. Оливер Б. Межзвездная связь. - В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.296-310.
9. Шварцман В.Ф. Эксперимент МАНИЯ и возможности поиска внеземных цивилизаций в оптическом диапазоне. – В сб. Проблема внеземных цивилизаций. – М.: Наука, 1981. Труды Зеленчукской школы-семинара СЕТИ, октябрь 1975.
10. Тартер Дж. Обзор экспериментальных исследований по поиску сигналов ВЦ в радио- и оптическом диапазоне. В сб. Проблема поиска жизни во Вселенной: Труды Таллинского симпозиума. – М.: Наука, 1986.
11. Нартов С.С., Носач О.Ю. Исследование шумов узкополосного квантового усилителя слабых сигналов на базе йодного фотодиссоционного лазера. - Препринт ФИАН № 21. Москва, 1994.
12. Носач О.Ю., Орлов Е.П. Проблема достижения квантового предела приема слабых лазерных импульсов на фоне мощной засветки и возможность ее решения с помощью йодных лазеров. - Препринт 20, Москва, ФИАН, 1994. 24 с.
13. Земсков Е.М., Казанский В.М., Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю. Патент РФ № 2133533 от 30.09.1997 г. Способ спектральной фильтрации оптических

- сигналов и устройство для его осуществления - активный квантовый фильтр. - Изобретения, №20, С. 480 (1999).
14. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Лазерное приемное устройство с квантовым пределом чувствительности в ближнем ИК-диапазоне. – Квантовая электроника, 2000, Т. 30, № 9, С. 833-838.
 15. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Применение йодного активного квантового фильтра для усиления яркости изображений. Квантовая электроника. 2001. Т.31. №5. С.419-420.
 16. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Анализ помехозащищенности лазерного приемного устройства с йодным активным квантовым фильтром. - Препринт ФИАН № 27. Москва 2001. 27 с.
 17. Kutaev Yu.F., Mankevich S.K., Nosach O.Yu., Orlov E.P. Noise immunity of a laser receiver with an iodine active quantum filter. - Journal of Russian Laser Research. 2002. V.23. N.3. P.235.
 18. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Влияние мощной фоновой засветки на чувствительность ЛПУ с йодным активным квантовым фильтром. – Квантовая электроника, 2002, Т. 32, № 4, С. 349-356.
 19. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент № 2152056 РФ от 23.06.1999 г. Способ лазерной локации и устройство для его осуществления. Изобретения. 2000. №.18. С.434-435.
 20. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент № 2183841 РФ от 24.01.2001 г. Способ лазерной локации и лазерное локационное устройство для его осуществления. Изобретения. 2002. №17. С.327-329.
 21. Ахменев А.Д., Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П., Хишев А.А. Патент № 2191406 РФ от 19.06.2001 г. Способ доставки излучения на движущийся объект и устройство для его осуществления. Изобретения. 2002. № 29. С.400-402.
 22. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент № 2249234 РФ от 08.08.2003 г. Способ лазерной локации и локационное устройство для его осуществления. Изобретения. 2005. №9.
 23. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент № 2248555 РФ от 20.10.2003 г. Способ определения характеристик лазерной среды. Изобретения. 2005. №8.

24. Зуев В.С., Катулин В.А., Носач В.Ю., Носач О.Ю. Исследование спектра люминесценции атомарного йода (лазерный переход $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$). ЖЭТФ, 1972, Т.62, Вып.5, 1673-1680.
25. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. Мощный йодный лазер. // Перевод с англ. под ред. В.С.Зуева. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 160 с.
26. Борович Б.Л., Зуев В.С., Катулин В.А., Михеев Л.Д., Николаев Ф.А., Носач В.Ю., Носач О.Ю., Розанов В.Б. Сильноточные излучающие разряды и газовые лазеры с оптической накачкой. – В кн. Радиотехника (Итоги науки и техники). – М.: ВИНТИ, 1978, Т.15. – 300 с.
27. Борович Б.Л., Зуев В.С., Катулин В.А., Носач В.Ю., Носач О.Ю., Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Характеристики усилителя йодного лазера коротких импульсов. – Квантовая электроника, 1975, Т.2, № 6, С.1282-1295.
28. Анненков В.И. и др. Новые возможности установки «Искра-5». – Квантовая электроника, 2006, Т.36, С.508.
29. Зуев В.С. Фотодиссоционный лазер с накачкой ударной и тепловой волнами. - Препринт ФИАН № 161. Москва, 1990. – 69 с.
30. Аржанов В.П. и др. Йодный лазер с накачкой светом фронта ударной волны, создаваемой взрывом взрывчатого вещества. Квантовая электроника. 1992. Т.19. №2. С.135-138.
31. Зарубин П.В. Академик Басов, мощные лазеры и проблема противоракетной обороны. Квантовая электроника. 2002. Т.32(12). С.1048-1064.
32. Юрышев Н.И. Кислородно-йодный лазер с химической накачкой. Обзор. – Квантовая электроника, 1996, Т. 23, № 7, С. 583.
33. Development of technical proposal to create multichannel iodine laser, generating 5 MTAI the third harmonic frequency and experimental investigations of the "Risk Reduction Programs" (IGNIS Project). - <http://www.istc.ru/istc/sc.nsf/html/projects.htm?open&lang=ru&id=0105>
34. Парафонова В. Ядерный синтез в лазерной искре. – <http://nauka.relis.ru/05/0302/05302002.htm>
35. Су-Шу Хуанг. Проблема жизни во вселенной и образование звезд. – В сб. «Межзвездная связь» под ред. А.Камерона. М.: Мир, 1965, С.96-99.

36. Физические величины. Справочник под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991. С.1208.
37. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. // Перевод с англ. Под ред. Г.П.Мотулевич. М.: Наука, 1970. С. 432.
38. Большие наземные оптические телескопы, $10 \text{ м} > D > 3 \text{ м}$. – <http://astrotelescope.narod.ru/tele3links.html>
39. Кардашев Н.С. Передача информации внеземными цивилизациями. // Астрономический журнал. 1964. Т.41. С. 282.
40. Теребиж В.Ю. Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 80 с.
41. Thirty-Meter Telescope Project Pages. - <http://tmt.ucolic.org/>
42. Enabling a Giant Segmented Mirror Telescope for the Astronomical Community. – <http://www.aura-nio.noao.edu/book/index.html>
43. The Extrasolar Planets Encyclopaedia (Maintained by Jean Schneider) (Interactive Catalog; update 26.09.2006) - <http://exoplanet.eu/catalog.php>
44. Зуев В.С., Корольков К.С., Крылов А.Ю., Носач О.Ю., Поскачеев А.Ю. Интерферометрическое измерение поглощения излучения йодного лазера в атмосфере. Квантовая электроника, 1988, Т.15, № 10, С.1959-1966.