



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.3>

УДК: 535.343.4, 543.422

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТГц СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКОТОКСИКАНТОВ С ЦЕЛЬЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.Л. Вакс<sup>1,2</sup>, Ю.В.Кистенев<sup>3</sup>, О.В.Громова<sup>4</sup>, Е.С.Бехтерева<sup>4</sup>,  
Е.Г. Домрачева<sup>1,2</sup>, М.Б. Черняева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского  
603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Томск, пр. Ленина, 30

Статья поступила в редакцию 13 января 2025 г.

**Аннотация.** Работа посвящена применению микроволновой и терагерцовой спектроскопической техники и методов для экологических приложений и мониторинга. Проведены предварительные квантово-химические расчеты вращательных спектров некоторых исследованных хлорсодержащих веществ. Измерены линии поглощения вращательного спектра ряда хлорсодержащих веществ (дихлорметан, хлороформ) в 2-мм диапазоне с использованием разработанных авторами спектрометров. Выявленные в ходе исследований спектроскопические линии поглощения некоторых хлорсодержащих веществ могут быть использованы для экологического мониторинга.

**Ключевые слова:** ТГц спектроскопия высокого разрешения, экотоксикант, экологический мониторинг, линия поглощения.

**Финансирование:** Исследования спектров хлороформа выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

**Автор для переписки:** Черняева Мария Борисовна, [masha@ipmras.ru](mailto:masha@ipmras.ru)

## Введение

На сегодняшний день в мире накоплены значительные объемы токсичных химических веществ (ТХВ) и химически опасных веществ (ХОВ), которые в случае попадания в окружающую среду в чрезвычайных ситуациях могут создать угрозу массового поражения людей и нанести ущерб окружающей среде путем заражения больших территорий. Поэтому мониторинг состояния экологической обстановки вблизи крупных перерабатывающих предприятий является межгосударственной задачей большой значимости. Кроме того, задачи экспресс-диагностики паров этих веществ в атмосфере обусловлены необходимостью противодействия угрозе террористических актов с использованием ТХВ и ХОВ.

Помимо промышленных выбросов в атмосферу вредных веществ и утечек с производств и складов, в атмосфере содержатся вещества природного происхождения, вредные для природы и человека. Молекулярные компоненты в следовых концентрациях могут оказывать существенное влияние на биохимию атмосферы, погоду и изменение климата в силу своей высокой химической активности [1-3]. Основными проблемами, связанными с наличием в атмосфере галогенсодержащих компонентов как природного, так и искусственного происхождения, являются парниковый эффект и истощение озонового слоя. Оперативный контроль таких соединений в атмосфере, их выбросов с поверхности водоемов и почв актуален для мониторинга состояния атмосферы. Хлорфторуглероды и их влияние на разрушение озонового слоя интенсивно изучались в течение последних трех десятилетий [4,5]. Атмосферный хлороформ ( $\text{CHCl}_3$ ) – короткоживущий газ, который разлагается на фосген, озоноразрушающий хлористый водород, хлор, углекислый газ и воду [6].

В природе хлороформ продуцируется фитопланктоном и макрофагами [7]. Вода, содержащая фитопланктон, после стандартной процедуры хлорирования на очистных сооружениях может содержать хлороформ в концентрациях, превышающих предельно допустимую [8].

Помимо вышеперечисленного, в настоящее время остро стоит проблема хранения опасных и токсичных соединений (ТС). Помимо ТС, под контроль должны быть поставлены продукты их распада и их примеси, некоторые из которых лишь немногим менее токсичны, чем ликвидированные ТС. Это касается люизита (2-хлорвинилдихлорарсин,  $\text{ClCHCHAsCl}_2$ ), поскольку он является токсином общепригодного и кожно-разрывного действия из-за наличия в молекуле фрагмента  $\text{AsCl}_2$ . [9] В результате разложения люизита образуются мышьяксодержащие продукты, например,  $\text{ClCHCHAsO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{AsClO}(\text{OH})_2$  и др., загрязняющие окружающую среду: воздух, поверхность почвы, водоемы и т. д. Контроль состояния окружающей среды в местах хранения таких веществ и при их транспортировке, а также при их уничтожении является актуальной задачей. В работе [10] представлены результаты исследования продуктов распада 2-хлорвинилдихлорарсина (люизита) методом терагерцовой (ТГц) и субтерагерцовой (субТГц) нестационарной спектроскопии. Спектроскопические исследования проводились в два этапа: 1) измерения при  $T = 295 \text{ K}$  (люизит и его примесный состав); 2) измерения после нагрева до  $460 \text{ K}$  (продукты разложения люизита). Выявлены линии поглощения характерных продуктов распада 2-хлорвинилдихлорарсина в газовой фазе (хлорметан, формальдегид, ацетальдегид, акриальдегид, гликольальдегид, ацетонитрил, пропионитрил и др.) и технологических примесей (оксид серы IV).

Целью данной работы является исследование возможностей использования методов ТГц нестационарной газовой спектроскопии для обнаружения примесей токсичных и опасных веществ в окружающей среде, в том числе выявление линий поглощения, пригодных для обнаружения конкретных токсичных хлорсодержащих веществ (хлороформа и дихлорметана) и продуктов их разложения.

## 1. Методы

Методы ТГц нестационарной спектроскопии высокого разрешения берут свое начало в основном в микроволновой физике. Физические принципы нестационарной газовой спектроскопии описаны в [11]. Двухуровневая квантовая система взаимодействует с электрическим гармоническим сигналом. Физическими макроскопическими величинами, представляющими интерес в микроволновых экспериментах, являются поляризация и разность населенностей уровней энергии, между которыми происходит переход, отнесенная к единице объема. Именно для этих величин записана система уравнений Блоха, описывающая взаимодействие зондирующего излучения с молекулами исследуемого газа, как для стационарного (время взаимодействия излучения с системой больше времен релаксации), так и для нестационарного (время взаимодействия излучения с системой меньше времени релаксации) случаев. [11] В нестационарном случае возникает эффект переходного поглощения зондирующего излучения, когда излучение вводится в резонанс с двухуровневой системой за время, меньшее времен релаксации, и переходного излучения в ту же моду поля, возникающего после вывода излучения из резонанса за время, меньшее времен релаксации. При этом процессы возникновения и распада макроскопической поляризации в образце исследуемого газа чередуются. Сигнал на детекторе пропорционален мнимой части свободно затухающей поляризации и содержит информацию о времени релаксации и концентрации молекул.

ТГц спектрометр высокого разрешения может быть реализован в режиме фазовой манипуляции воздействующего на газ излучения [12], где ввод системы в резонанс и вывод из него производится периодическим переключением фазы (со сдвигом на  $\pi$ ) излучения, проходящего через ячейку и взаимодействующего в резонансе с газом. При этом линия поглощения газа, записанная с использованием такого спектрометра, представляет собой вид, схожий со второй производной от формы линии поглощения. Такой спектрометр может работать в двух режимах – сканирования частоты в заданном диапазоне

для поиска линий поглощения компонентов газовой смеси и отслеживания изменения коэффициента поглощения конкретного вещества на выбранной резонансной частоте линии поглощения.

Другим эффектом, используемым в нестационарных экспериментах, является эффект быстрого свипирования, когда частота перестраивается (свируется) через молекулярный резонанс за время, меньшее времен релаксационных процессов [13]. В режиме быстрого свипирования частоты форма регистрируемой линии представляет собой биения между затухающим сигналом с линии поглощения от молекул газа и прошедшим линейным частотно-модулированным сигналом от источника излучения. Хотя молекулы находятся в резонансе в течение короткого периода времени, в молекулах может быть вызвана значительная поляризация, что приводит к заметному затуханию в конце свипирования. Поэтому режим быстрого свипирования приводит к наведению поляризации во время свипирования и последующему излучению после его завершения [11].

Разработаны и реализованы спектрометры ТГц диапазона с фазовой манипуляцией излучения, воздействующего на газ, на основе генератора обратной волны (ЛОВ) (например, ЛОВ типа ОВ-87 (118-178 ГГц)) и полупроводниковых генераторов [12]. Для обеспечения требований спектроскопии высокого разрешения точность установки мгновенных значений частоты источника излучения для режима фазовой манипуляции должна быть не хуже  $10^{-8}$  относительно резонансной частоты излучения, что достигается за счет использования фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) источника излучения на основе ЛОВ по высокостабильному опорному синтезатору частоты. При этом реализуется аппаратное спектральное разрешение на уровне 10 кГц, необходимое для однозначной регистрации и идентификации линий поглощения многих газов с высоким разрешением. Выходная мощность сигнала ЛОВ составляет примерно нескольких десятков милливатт. Несмотря на наличие потерь в тракте и в волноводных узлах, мощность сигнала на выходе источника излучения спектрометра превышает 10 мВт. При измерениях

в частотном диапазоне 118-178 ГГц для обеспечения необходимого уровня мощности на детекторе на выходе источника излучения устанавливается аттенюатор [12,14]. Такой источник излучения может применяться в качестве опорного источника для реализации спектрометра более высокочастотного диапазона с использованием умножения частоты сигнала, поскольку обеспечиваемый уровень выходной мощности достаточен для использования умножителя частоты.

Разработаны и реализованы нестационарные спектрометры на основе генератора Ганна с каскадным умножением частоты и гетеродинного приемника, где в качестве гетеродина используется второй генератор Ганна. Разработан и реализован нестационарный спектрометр, работающий в диапазоне частот 110-170 ГГц, на основе коммерческих приборов полупроводниковой электроники с использованием подхода, основанного на умножении частоты опорного генератора. При этом источник излучения был создан на базе эталонного синтезатора («LuftResearch») с рабочим диапазоном частот  $9,17 \div 14,17$  ГГц, сигнал которого умножался с помощью умножителя частоты на 12 («VDI», США) (выходная мощность при этом составляет  $3 \div 5$  мВт), а в приемной системе был использован детектор на основе диода с барьером Шоттки («VDI», США). Для одновременного исследования динамики концентрации двух компонентов многокомпонентной газовой смеси предложена и реализована концепция ТГц-спектрометра с двумя независимыми источниками излучения (на базе двух ЛОВ диапазона 118-175 ГГц) и единым приемным блоком и блоком обработки сигнала. Оба источника работают в режиме фазовой манипуляции, излучение с одного и второго синтезаторов подается в измерительную ячейку попеременно с разнесением фазовых манипуляций по времени, достаточному для затухания сигнала от переходных процессов в газе после воздействия предыдущего импульса. Реализован также вариант двухканального спектрометра на основе двух идентичных источников излучения на ЛОВ в диапазоне 118-175 ГГц, но в одном из каналов установлен утроитель частоты, работающий в диапазоне 330-390 ГГц.

Кроме того, разработан и создан спектрометр с быстрым свипированием частоты на основе ЛОВ – типа ОВ-87 (118-178 ГГц). [12-14] Для обеспечения требований спектроскопии высокого разрешения относительная неопределенность установки мгновенных значений частоты ЛОВ в процессе быстрого свипирования должна быть не хуже  $10^{-6}$ . В спектрометре использовалась ФАПЧ ЛОВ под высокостабильный опорный генератор – опорный синтезатор частоты. В качестве опорного синтезатора использовался коммерческий синтезатор частоты LMX2594 (Texas Instruments, США) (10-15 ГГц), который представляет из себя встраиваемый в спектрометр модуль. В приемной системе был использован детектор на основе диода с барьером Шоттки («VDI», США).

Идентификацию линий поглощения можно проводить с использованием спектроскопических молекулярных баз данных [15,16], однако для некоторых исследуемых веществ информация в них отсутствует, поэтому требуются предварительные квантово-химические расчеты их вращательных спектров. Объектами исследования были галогенированные углеводороды. Для спектроскопических измерений использовались спектрометры на ЛОВ с фазовой манипуляцией излучения и с быстрым свипированием по частоте с используемым рабочим диапазоном 118-175 ГГц. В первую очередь были исследованы пары химически чистого хлороформа (массовая доля хлороформа – не менее 99,85%, массовая доля воды ( $H_2O$ ) – не более 0,05%, массовая доля кислот ( $HCl$ ) – не более 0,001%). Газовая смесь стабилизирована этанолом с массовой долей, варьируемой от 0,2 до 0,6%. Вращательные спектры этанола, воды и соляной кислоты содержатся в спектроскопических молекулярных базах данных [15,16], однако линии поглощения воды и соляной кислоты лежат вне диапазона проводимых измерений, а линии этанола не перекрывают участки спектра, содержащие серии линий вращательного спектра хлороформа для изотопологов вида симметричных волчков. Кроме того, был исследован вращательный спектр дихлорметана. Поскольку его нет в базах данных, были осуществлены теоретические расчеты спектра и проведены

измерения линий поглощения, которые в дальнейшем могут быть использованы для обнаружения дихлорметана в окружающей среде.

## 2. Результаты

Спектры поглощения хлороформа в газовой фазе измерялись в диапазоне 118-175 ГГц. Для измерений использовался разработанный в ИФМ РАН ТГц спектрометр высокого разрешения с фазовой манипуляцией воздействующего на газ излучения. В рабочем диапазоне спектрометра часть участков представлена в литературе, а для части спектральных участков, где также лежат линии поглощения хлороформа и его изотопологов, спектроскопические данные отсутствуют. Некоторые участки спектра хлороформа для основного и некоторых возбужденных колебательных состояний, которые не представлены в литературе, были рассчитаны с использованием вращательных констант [17] и измерены с идентификацией линий поглощения. Были проведены измерения спектров чистого хлороформа ( $\text{CHCl}_3$ ) в основном состоянии. Участок спектра для изотополога  $\text{CH}^{35}\text{Cl}_3$  (который является симметричным волчком) вблизи 158 ГГц (для квантового числа нижнего состояния энергии перехода  $J = 23$ ) представлен на рис. 1. Вращательные линии для низких  $K$  перекрываются, поэтому спектр имеет характерный вид, а, кроме того, три нижних перехода для  $K = 0, 1, 2$  при перекрытии дают один пик.

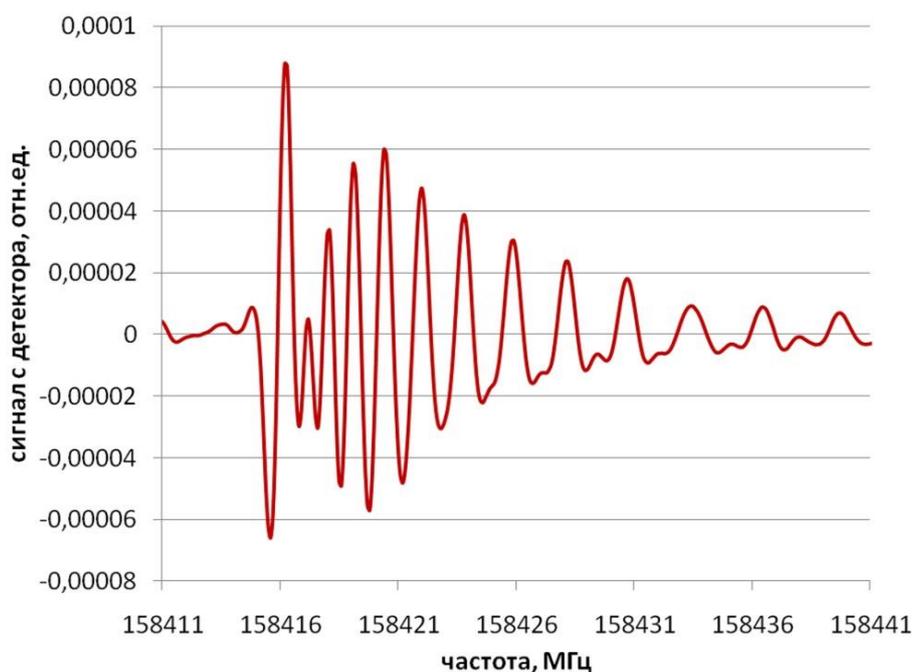


Рис. 1. Пример участка спектра основного состояния изотополога  $\text{CH}^{35}\text{Cl}_3$ , содержащий линии поглощения с центральными частотами 158416,2 МГц, 158418,1 МГц, 158419,1 МГц, 158420,4 МГц, 158422 МГц, 158423,8 МГц, 158425,9 МГц, 158428,1 МГц, 158430,7 МГц, 158433,4 МГц, 158436,4 МГц и 158439,7 МГц.

Другой задачей было измерение спектров поглощения дихлорметана и его изотопологов по атомам хлора для различных концентраций дихлорметана. Как и в случае с хлороформом в чистом дихлорметане могут присутствовать все возможные изотопологи дихлорметана, а именно  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$ ,  $\text{CH}_2^{37}\text{Cl}_2$  и  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}^{37}\text{Cl}$ . Все эти изотопологи представляют собой асимметричные волчки. В каталогах [15,16] данные об этом соединении, включая изотопологи, отсутствуют и информацию о центральных частотах и интенсивностях линий поглощения дихлорметана можно получить только из литературных источников, где представлены отдельные части спектра. Была разработана методика проведения измерений. Она заключалась в следующем. Сначала с использованием констант, приведенных в [18], с помощью программы расчета спектра асимметричного волчка ASROT [19] свободного доступа был рассчитан вращательный спектр поглощения дихлорметана в диапазоне частот 110-180 ГГц. Затем с целью обнаружения всех линий поглощения дихлорметана, лежащих в указанном диапазоне, были проведены измерения

спектров поглощения для образца дихлорметана с концентрацией 100%, а также с концентрацией 1000 ppm с помощью ТГц-спектрометра с быстрым свипированием частоты (измерения проводились практически во всем рабочем диапазоне спектрометра – 118-175 ГГц). Пример записи спектра поглощения чистого дихлорметана во всем диапазоне измерений с использованием спектрометра с быстрым свипированием частоты (118-175 ГГц) приведен на рис.2. Спектр дихлорметана очень сложен. Кроме того, что присутствуют разные изотопологи, представляющие асимметричные волчки, а, следовательно, имеющие большое число разрешенных вращательных переходов с частотами, попадающими в диапазон измерений, линии поглощения вследствие квадрупольного расщепления, обусловленного наличием квадрупольного момента у ядер Cl и взаимодействием вращения молекулы со спинами ядер Cl, представляют собой не только синглеты, а также дублеты, триплеты и даже квадруплеты [18].

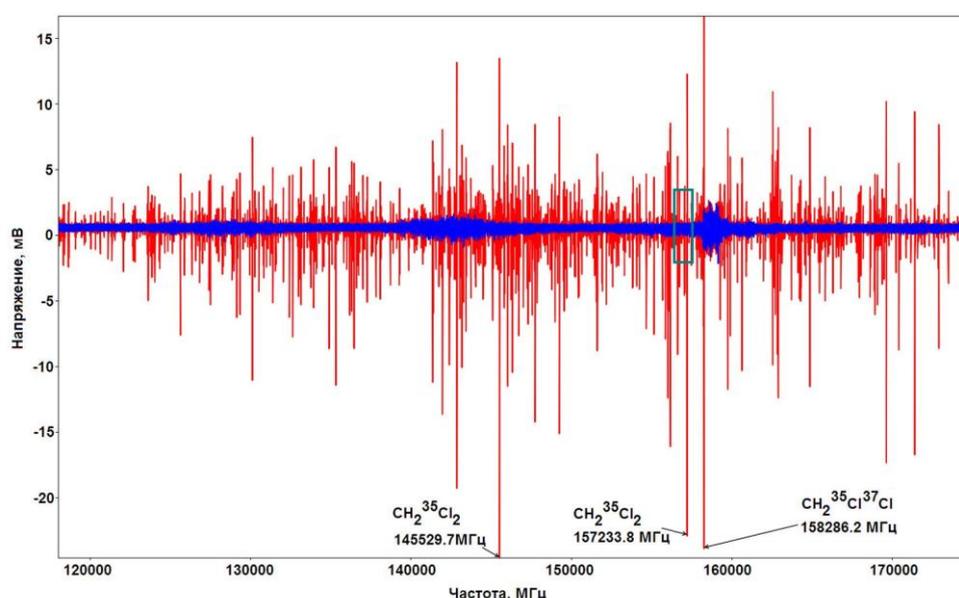


Рис. 2. Запись спектра поглощения чистого дихлорметана (красный график) в сравнении со спектром пустой кюветы (синий график) во всем диапазоне измерений (118-175 ГГц), полученного с использованием ТГц спектрометра с быстрым свипированием по частоте. Зеленый прямоугольник – область, приведенная в увеличенном масштабе на рис. 3.

Пример участка спектра с линиями поглощения  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$  и  $\text{CH}_2^{37}\text{Cl}_2$  (спектроскопические характеристики приведены в таблице 1) приведен на рисунке 3.

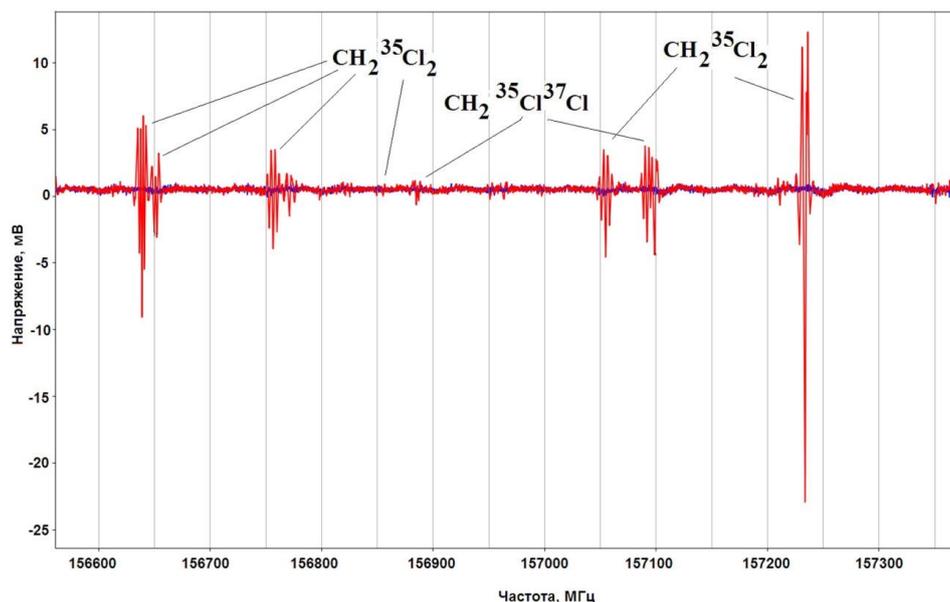


Рис. 3. Запись выделенного на рис.2 участка спектра чистого  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , зарегистрированного с помощью ТГц-спектрометра с быстрым свипированием частоты в диапазоне 156,6-157,3 ГГц с линиями поглощения  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$  и  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}^{37}\text{Cl}$  (красный график) в сравнении со спектром пустой кюветы (синий график).

Таблица 1. Спектроскопические характеристики зарегистрированных линий поглощения изотопологов  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ .  $f_{\text{эксп}}$  – частота, зарегистрированная в эксперименте,  $f_{\text{теор}}$  – частота, рассчитанная теоретически.

Изотополог	Эксперимент		Данные из расчетов		
	$f_{\text{эксп}}$ , МГц	$f_{\text{теор}}$ , МГц	Коэффициент поглощения, $\text{см}^{-1}$	$J''K''-1K''_1$	$J'K'-1K'_1$
$\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$	145529,7	145529.5578	2.75E-04	58 4 54	58 3 55
	156639,1	156638,9639	4,05E-04	29 3 27	29 2 28
	156650	156650,1817	1,02E-04	24 6 19	25 5 20
	156652,5	156652,4194	1,02E-04	24 6 18	25 5 21
	156675,6	156756,3309	1,94E-04	38 2 36	37 3 35
	156855,8	156856,3832	1,12E-04	10 2 8	9 1 9
	157055	157054,6019	2,81E-04	57 3 54	57 2 55
	157233,9	157233,6730	5,77E-04	24 1 24	23 0 23
$\text{CH}_2^{37}\text{Cl}^{35}\text{Cl}$	156885	156884,6238	4,00E-04	30 3 28	30 2 29
	157092,2	157092,1133	1,92E-04	39 2 37	38 3 36
	158286,2	6.15E-04	158286.3095	27 0 27	26 1 26

Были выбраны спектральные области с наиболее интенсивными линиями поглощения. Затем с использованием спектрометра с фазовой

манипуляцией излучения на основе ЛОВ, чувствительность которого лучше, чем для спектрометра с быстрым свипированием по частоте и составляет порядка  $10^{-9} \text{ см}^{-1}$ , были проведены измерения в диапазонах 140-145 ГГц и 155-159 ГГц образцов дихлорметана с различной концентрацией (10 ppm, 100 ppm, 100%), начиная с образца с наименьшей концентрацией.

Линия поглощения дихлорметана на частоте 157,234 ГГц (теоретически рассчитанная частота составляет 157,233673016 ГГц) показана на рис. 4 для двух концентраций. В исследуемых образцах содержание дихлорметана составляло 10 ppm (рабочее давление при измерении составляло 0,22 мбар) (рис. 4а) и 100% (рабочее давление при измерении составляло 0,05 мбар) (рис.4б). Эта линия представляет собой триплет, что хорошо видно для чистого дихлорметана, но при снижении концентрации триплет уже не разрешается.

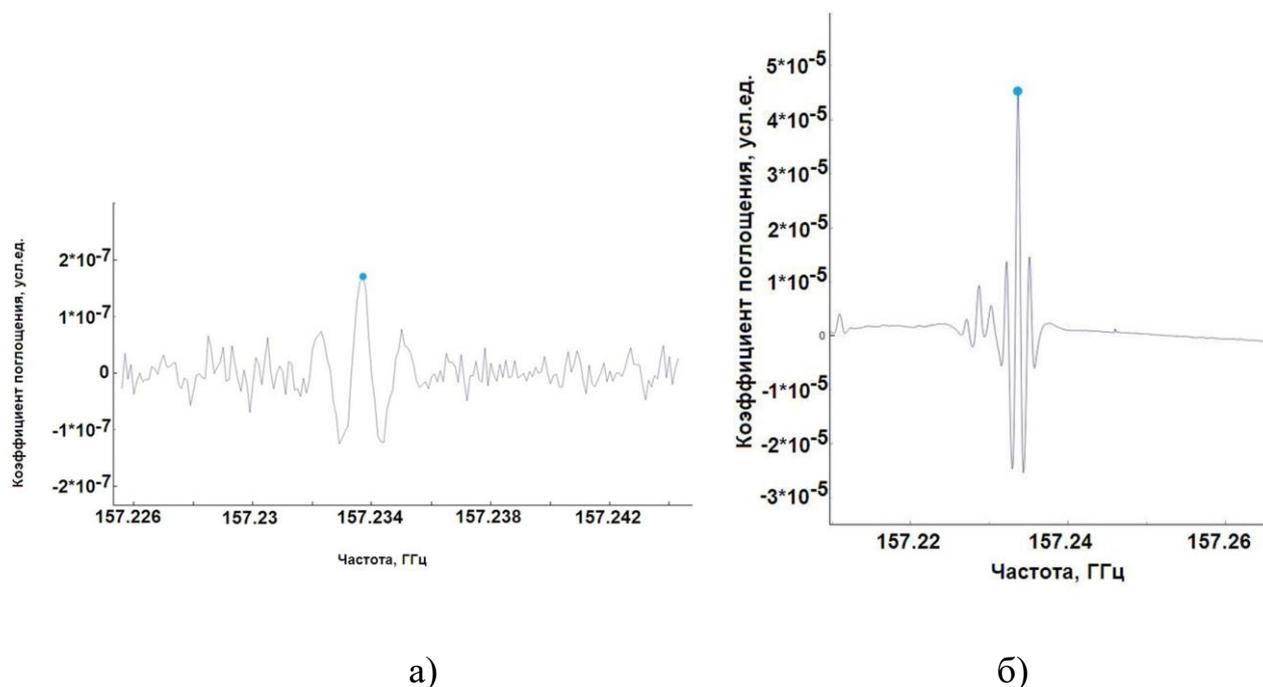


Рис. 4 Пример участка спектра изотополога  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$  вблизи 157,234 ГГц (теоретически рассчитанная частота 157233,673016 МГц ( $24\ 1\ 24 \leftarrow 23\ 0\ 23$ )) для концентрации  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$  равной 10 ppm (а) и для чистого дихлорметана (в концентрации 100%) (б).

Представленные результаты измерений для разных концентраций демонстрируют возможность использования данной линии поглощения

для поиска дихлорметана в газовых смесях различного происхождения, в том числе и природного.

## **Заключение**

В работе представлены результаты исследования ТГц спектров ряда хлорсодержащих веществ (дихлорметан, хлороформ), представляющих опасность для человека и окружающей среды. Показаны возможности ТГц нестационарной спектроскопии для идентификации веществ по их линиям поглощения. Выявлены линии поглощения в 2-мм диапазоне длин волн исследуемых соединений (дихлорметана, хлороформа), которые могут быть использованы для обнаружения и контроля этих веществ спектроскопическими методами. Например, выявлена и протестирована для различных концентраций одна из линий поглощения дихлорметана – триплет с центральной частотой 157233,673016 МГц, что может быть использовано для контроля этого вещества в окружающей среде, в частности, в атмосфере. В связи с отсутствием данных об исследуемых веществах в онлайн-овых спектроскопических каталогах, а также неполнотой данных в литературе полученные результаты имеют фундаментальное значение, а в связи с перспективой использования спектроскопического подхода для мониторинга окружающей среды, результаты имеют большое практическое значение.

**Финансирование:** Исследования спектров хлороформа выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

## Литература

1. Andreae M.O., Crutzen P.J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry //Science. – 1997. – Т. 276. – №. 5315. – С. 1052. <https://doi.org/10.1126/science.276.5315.1052>.
2. Novak G.A., Bertram T.H. Reactive VOC production from photochemical and heterogeneous reactions occurring at the air–ocean interface //Accounts of Chemical Research. – 2020. – Т. 53. – №. 5. – С. 1014-1023. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00095>.
3. Kistenev Y.V. et al. A study of trace atmospheric gases at the water–atmosphere interface using remote and local IR laser gas analysis: A review //Atmospheric and Oceanic Optics. – 2022. – Т. 35. – №. Suppl 1. – С. S17-S29. <https://doi.org/10.1134/S1024856023010074>.
4. World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of stratospheric ozone: 1989 //Report 20. – 1990.
5. United States. Office of Mission to Planet Earth. Scientific assessment of ozone depletion, 1994. – World Meteorological Organization, 1995. – №. 37.
6. Locating and estimating air emissions from sources of chloroform //US Environ Protect Agency. – 1984
7. Кистенев Ю.В. и др. Потенциал компактных спектрометров субтерагерцового диапазона на основе каскадного умножения частоты для локального экологического мониторинга атмосферы //Известия высших учебных заведений. Радиофизика – 2022. – Т. 65. – №. 10. – С. 820-834. – <https://doi.org/10.1007/s11141-023-10254-y>.
8. Говорова Ж.М., Говоров О.Б. Влияние фитопланктона на формирование качества воды и методы его удаления. Часть 1 //Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – №. 2. – С. 32-35.
9. Уткин А.Ю. и др. Химия и технология уничтожения" вязкого" люизита //Российский химический журнал. – 2007. – Т. 51. – №. 2. – С. 19-23

10. Вакс В.Л. и др. Анализ продуктов распада люизита с использованием метода субтерагерцовой спектроскопии //Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – №. 8. – С. 661-664. – <https://doi.org/10.1134/S1024856013010156>.
11. Шмальц Т., Флайгер У. Когерентная нестационарная микроволновая спектроскопия //Лазерная и когерентная спектроскопия. – 1982.
12. Вакс В.Л. и др. Спектроскопия высокого разрешения терагерцевого частотного диапазона для аналитических приложений // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 7. – С. 765-776. – <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.07.038613>
13. Вакс В.Л. и др. О возможности продвижения метода нестационарной газовой спектроскопии, реализованного путём быстрого свипирования частоты, вверх по терагерцевому диапазону // Известия высших учебных заведений. Радиофизика – 2022. – Т. 65. – № 10. – С. 835–852. – [https://doi.org/10.52452/00213462\\_2022\\_65\\_10\\_835](https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_10_835)
14. Вакс В.Л. и др. Терагерцовая спектроскопия высокого разрешения для анализа многокомпонентных газовых смесей различного происхождения. //Терагерцовая фотоника (к 300-летию Российской академии наук (РАН)) – 2023. – с.576-632.
15. Pickett H. M. et al. Submillimeter, millimeter, and microwave spectral line catalog //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 1998. – Т. 60. – №. 5. – С. 883-890.
16. Endres C.P. et al. The cologne database for molecular spectroscopy, CDMS, in the virtual atomic and molecular data centre, VAMDC //Journal of Molecular Spectroscopy. – 2016. – Т. 327. – С. 95-104.
17. Carpenter J.H., Seo P.J., Whiffen D.H. The rotational spectrum of chloroform in its ground and excited vibrational states //Journal of molecular spectroscopy. – 1995. – Т. 170. – №. 1. – С. 215-227. – <https://doi.org/10.1006/jmsp.1995.1066>.

18. Ulenikov O.N. et al. Submillimeter wave spectrum of methylene chloride,  $^{12}\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$ ,  $^{12}\text{CH}_2^{35}\text{Cl}^{37}\text{Cl}$  and  $^{12}\text{CH}_2^{37}\text{Cl}_2$  up to 1.1 THz //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2024. – Т. 319. – С. 108962. – <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.108962>.
19. Kisiel Z. PROSPE – Programs for ROtational SPEctroscopy // <http://info.ifpan.edu.pl/~kisiel/prospe.htm>.

**Для цитирования:**

Вакс В.Л., Кистенев Ю.В., Громова О.В., Бехтерева Е.С., Домрачева Е.Г., Черняева М.Б. Применение методов ТГц спектроскопии высокого разрешения для обнаружения экотоксикантов с целью экологического мониторинга. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.3>