

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.5>

УДК: 535.343.4, 543.422, 616-073.584

## АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МОЧИ ПРИ РАКЕ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ И ДОБРОКАЧЕСТВЕННОЙ ГИПЕРПЛАЗИИ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ МЕТОДОМ ТГЦ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В.Л. Вакс<sup>1,2</sup>, В.А. Анфертьев<sup>1,2</sup>, Е.Г. Домрачева<sup>1,2</sup>, М.Б. Черняева<sup>1,2</sup>,  
А.В. Масленникова<sup>2,3</sup>, В.А. Атдуев<sup>4</sup>, М.А. Родионов<sup>1,2</sup>, К.А. Атдуев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ИФМ РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

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

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России  
603950, БОКС-470, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д.10/1

<sup>4</sup> ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России  
603001, г. Нижний Новгород, Нижневолжская наб., д. 2

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2024 г.

**Аннотация.** Работа посвящена изучению состава метаболитов мочи человека больных раком предстательной железы и доброкачественной гиперплазией предстательной железы методом терагерцовой газовой спектроскопии высокого разрешения. Проведено сравнение состава метаболитов, образующихся при термическом разложении мочи больных раком предстательной железы, собранной с предварительным массажем предстательной железы, без предварительного массажа предстательной железы и больных доброкачественной гиперплазией предстательной железы. Использован разработанный авторами ТГц-спектрометр высокого разрешения с быстрым свипированием частоты (118-178 ГГц). Для идентификации веществ использованы бесплатные онлайн-базы данных по спектроскопии. Выявлены наборы метаболитов для трех типов образцов мочи и определены метаболиты,

которые можно рассматривать как потенциальные маркеры рака предстательной железы.

**Ключевые слова:** ТГц спектроскопия высокого разрешения, моча, метаболиты, рак предстательной железы, доброкачественная гиперплазия предстательной железы, химический состав, продукты термического разложения, линия поглощения.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках госзадания (FFUF-2024-0024/).

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

## Введение

Среди современных направлений в медицине можно выделить разработку подходов к диагностике и мониторингу терапии на основе метаболомики. Выявление определенного набора метаболитов – продуктов метаболизма в организме человека, синтезируемых при конкретной патологии или заболевании – метаболического профиля заболевания – является актуальной задачей. Биологические жидкости, а также ткани и газовые компоненты живого организма (выдыхаемый воздух, газы желудочно-кишечного тракта и т.д.) можно рассматривать как биологическую среду для выделения биомаркеров. Биологические жидкости (кровь, моча и т.д.) наиболее быстро реагируют на изменение процессов в организме человека при заболеваниях. Поэтому эти жидкости используются для медицинских клинических анализов (основными анализами при диагностике и контроле лечения являются общий анализ крови и общий анализ мочи). В метаболическом подходе для анализа образца используются физико-химические методы, такие как хроматография (для газовых или жидких образцов), в том числе в сочетании с масс-спектрометрией, спектроскопические методы. Биологические жидкости являются перспективным объектом исследования для определения метаболитов-биомаркеров заболеваний и патологий, поскольку, во-первых, многие вещества в них присутствуют в более высокой концентрации, чем в газовых выделениях биологического организма (например, выдыхаемом воздухе), а, во-вторых,

отбор проб для некоторых биологических жидкостей, например, мочи, является наиболее простой и одной из самых дешевых манипуляций.

В обзоре [1] представлена первая база данных специфических летучих веществ мочи (волатолом мочи), состоящая из 841 соединения из 80 химических классов, некоторые из которых возникают при раке. Важнейшей проблемой для человечества, несмотря на увеличение продолжительности жизни, в настоящее время становятся онкологические заболевания.

Рак предстательной железы (РП) является одним из наиболее часто встречающихся видов рака у мужчин во всем мире. В клинической диагностике маркером, выделяемым из сыворотки крови при раке, является простат-специфический антиген (ПСА). ПСА – это сериновая протеаза, регулируемая андрогенами, вырабатываемая эпителиальными клетками предстательной железы и РП. ПСА секретируется в виде неактивного профермента из 244 аминокислот и поступает в кровоток, где часть его претерпевает изменения, а часть циркулирует в виде свободного ПСА. [2]

Методами исследования, применяемыми в клинической диагностике рака в настоящее время, являются определение количества ПСА в крови и ректальное исследование предстательной железы. Также при подозрении на карциному простаты – трепанобиопсия простаты. Все три подхода не дают однозначной гарантии диагностики наличия или отсутствия злокачественной опухоли. Однако секретируемый предстательной железой ПСА попадает не только в кровь, но и впоследствии в мочу. В современной литературе [3-5] выделен ряд исследований мочи и крови, позволяющих обнаружить метаболиты и, прежде всего, ПСА с целью прогностических признаков и дифференциации рака. Традиционными методами исследования жидких образцов, используемыми в этих работах, являются жидкостная хроматография и  $^1\text{H}$ -ядерный магнитный резонанс.

Однако, несмотря на развивающийся метаболический подход к диагностике рака простаты, наборы метаболитов маркеров рака простаты до настоящего времени однозначно не идентифицированы. В работах по поиску

метаболитов, встречающихся при раке простаты, выявленные в исследованиях разных групп вещества, не совпадают и не сравниваются между собой. Кроме того, следует учитывать, что возраст больных раком простаты таков, что часто присутствуют сопутствующие заболевания, которые также влияют на состав метаболитов. Также необходимо принимать во внимание получаемую пациентом терапию, влияющую на организм, а, следовательно, на состав метаболитов. Например, в предыдущих исследованиях [6] было выявлено влияние платиносодержащей химиотерапии, проводимой при раке органов разных систем жизнеобеспечения организма, на мочевыделительную систему человека. При проведении химиотерапии изменяется состав продуктов термического разложения мочи, что может быть обусловлено появлением в ней белков при проявлении нефротоксического действия химиотерапии. Исходя из вышеизложенного, поиск метаболитов-маркеров, а также использование новых методов и подходов к их поиску в настоящее время является актуальной задачей. Одним из перспективных подходов является метод нестационарной терагерцовой (ТГц) газовой спектроскопии, который обладает одновременно высокой чувствительностью и разрешающей способностью и позволяет однозначно идентифицировать вещества в газовой смеси по их линиям поглощения.

## 1. Методы

Для анализа мочи с целью выделения характерных метаболитов использовался нестационарный ТГц-спектрометр высокого разрешения с диапазоном частот 118-178, работающий в режиме быстрого свипирования частоты [7, 8]. Эффект быстрого свипирования частоты приводит к поляризации газа во время развертки частоты, что сопровождается выделением газа после развертки. Для спектрометра с быстрым свипированием необходимо соблюсти условия, при которых свободно затухающий поляризационный сигнал от одного импульса не должен перекрываться другим (это условие ограничивает частоту повторения импульсов, которая должна быть равна

обратной величине времени релаксации молекул), а импульс не должен быть длиннее обратной величины ширины анализируемого диапазона. В исследовании участвовали образцы мочи пациентов с РП без массажа (12 образцов), раком предстательной железы с массажем (РПМ) (8 образцов), и гиперплазией предстательной железы (ГП) (10 образцов), проходивших лечение в Приволжском окружном медицинском центре Федерального медико-биологического агентства России (Нижний Новгород, Россия). Пациентов предупреждали о необходимости соблюдения диеты и отказа от употребления алкоголя в течение всего лечения. Возраст пациентов с онкологией составлял от 49 до 81 года, а пациентов с гиперплазией предстательной железы – от 58 до 83 лет. После сбора образец мочи замораживался и доставлялся для исследования спектроскопическими методами.

Процесс пробоподготовки описан в [6, 9]. При пробоподготовке образец мочи размораживали, часть пробы объемом около 2 мл наливали в колбу и обезвоживали методом вакуумной сушки, так как в пробе присутствует большое количество воды. Несмотря на отсутствие линий поглощения воды в рабочем диапазоне спектрометра, она создает основное давление в ячейке при напуске исследуемой смеси и мешает спектроскопическим измерениям по идентификации веществ, присутствующих в пробе в следовых концентрациях. После обезвоживания в колбе с пробой образовывалась тонкая пленка. Измерительную ячейку предварительно вакуумировали до давления 0,001 мбар. Летучие вещества из полученного остатка напускали в измерительную ячейку. Сначала измерения проводили без нагрева пробы, а затем с нагревом. Был записан спектр во всем рабочем диапазоне спектрометра для вакуумированной ячейки без напуска образца, который использовали при идентификации линий поглощения в качестве фона. После этого производили напуск смеси продуктов термического разложения в ячейку до рабочего давления в ячейке, которое для данного спектрометра составляло 0,05-0,1 мбар.

Линии поглощения были идентифицированы с использованием спектроскопических молекулярных баз данных [10, 11]. Подсчет количества

зарегистрированных линий поглощения в одном и том же диапазоне спектрометра при одних и тех же условиях измерения использовался для качественной оценки изменения концентрации конкретного соединения от образца к образцу. При более высоких концентрациях вещества в смеси регистрируются более слабые линии поглощения, при условии их присутствия в этом диапазоне.

## 2. Результаты

Пример записи спектров в рабочем диапазоне спектрометра для двух образцов мочи, взятых у пациентов с раком предстательной железы без массажа (РП) (образец №15) (синий цвет) и с массажем (образец №30) (красный цвет) представлены на рис. 1.

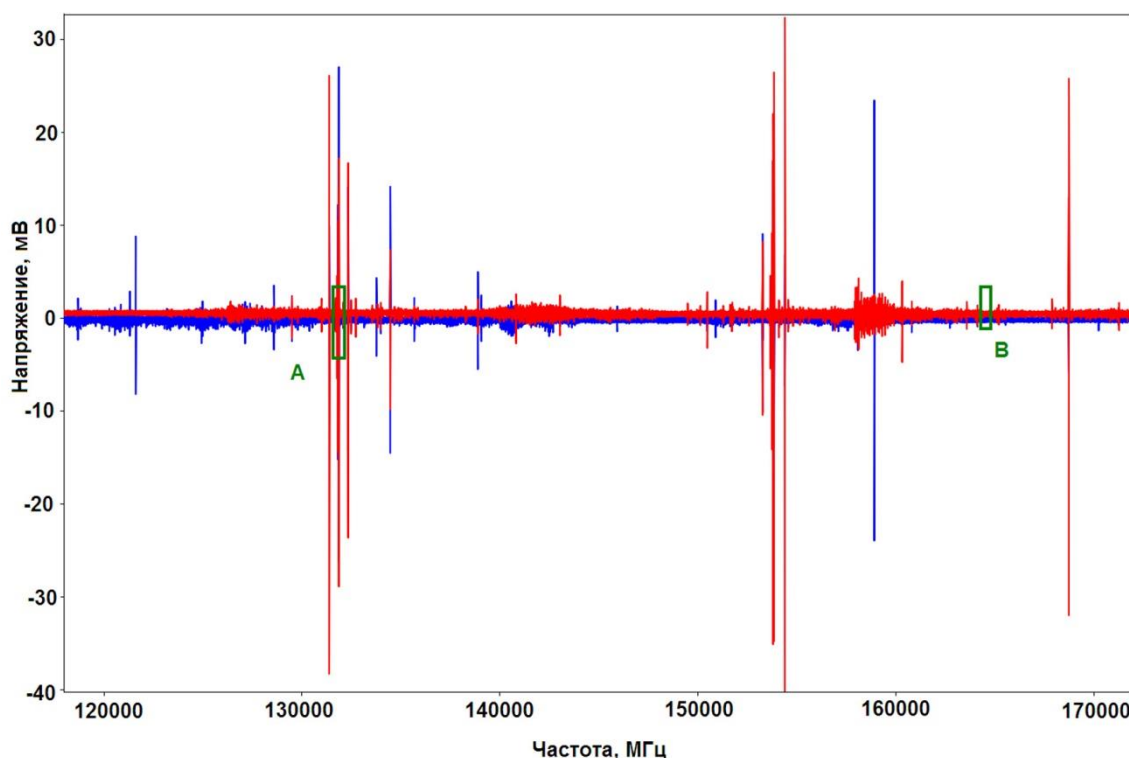


Рис. 1. Записи спектров в рабочем диапазоне спектрометра для двух образцов мочи, взятых у пациентов с раком предстательной железы без массажа (РП) (образец №15) (синий цвет) и с массажем (образец №30) (красный цвет).

В спектрах регистрируются сотни линий поглощения различных веществ (например, в спектре РП №15 зарегистрировано 280 линий поглощения, а в спектре РПМ №30 – 630 линий поглощения). Примеры отдельных участков рисунка 1, отмеченных как А и В, приведены на рис. 2 (участок А), содержащий

линии поглощения для обоих образцов, и 3 (участок В) с линиями поглощения, присутствующими только в образце РПМ, соответственно.

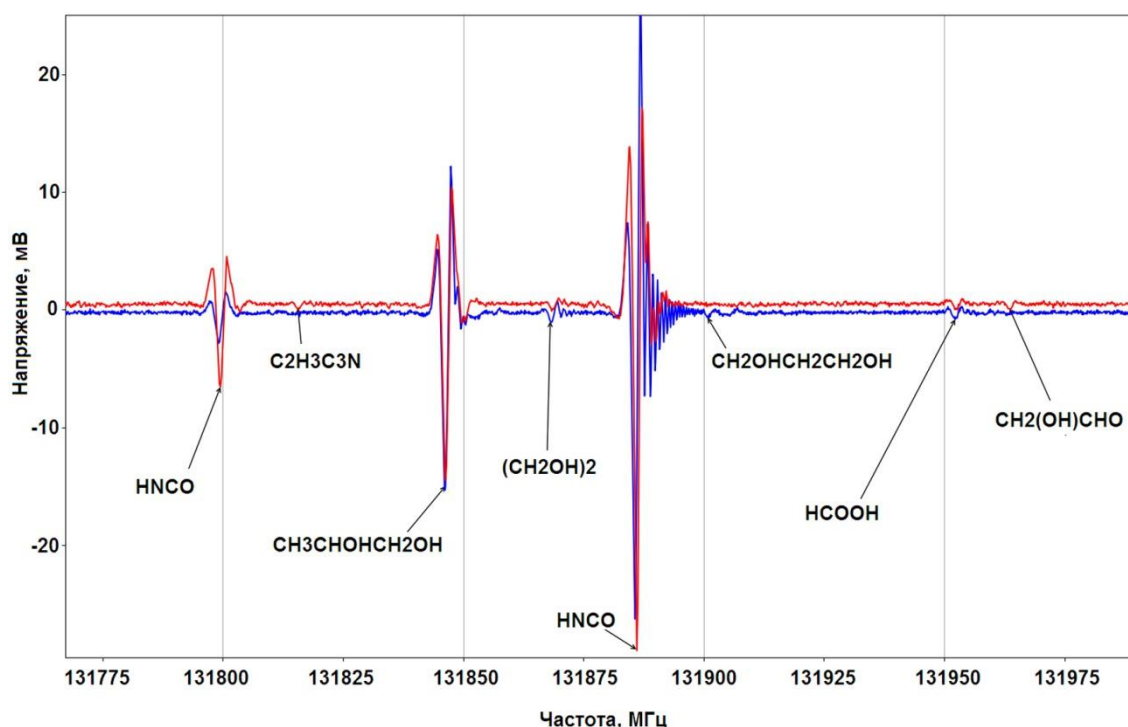


Рис. 2. Спектральный участок (А) для двух образцов мочи: РП (образец №15) (синий) и РПМ (образец №30) (красный) с линиями поглощения изоциановой кислоты ( $\text{HNCO}$ ) с центральными частотами  $f_{1\text{эксп}} = 131799.1$  МГц из эксперимента (частота из каталога  $f_{1\text{кат}} = 131799.2971$  МГц) и  $f_{2\text{эксп}} = 131885.7$  МГц ( $f_{2\text{кат}} = 131885.7341$  МГц), двух изомеров пропандиола – здесь в обоих образцах ( $\text{CH}_3\text{CHONCH}_2\text{OH}$ ) с  $f_{\text{эксп}} = 131846,2$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131846,2918$  МГц) и только для образца РП ( $\text{CH}_2\text{ONCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) с  $f_{\text{эксп}} = 131900.8$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131900.8327$  МГц), муравьиной кислоты ( $\text{HCOOH}$ )  $f_{\text{эксп}} = 131952.3$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131952.2245$  МГц), этиленгликоля ( $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ )  $f_{\text{эксп}} = 131868.3$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131868.4654$  МГц), а также присутствующими только в образце РПМ линиями винилцианоацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{C}_3\text{N}$ )  $f_{\text{эксп}} = 131815.9$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131815.9145$  МГц) и гликольальдегида ( $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$ )  $f_{\text{эксп}} = 131963.8$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 131963.4451$  МГц). Данные по центральным частотам ( $f_{\text{кат}}$ ) из каталогов приведены по [10, 11].

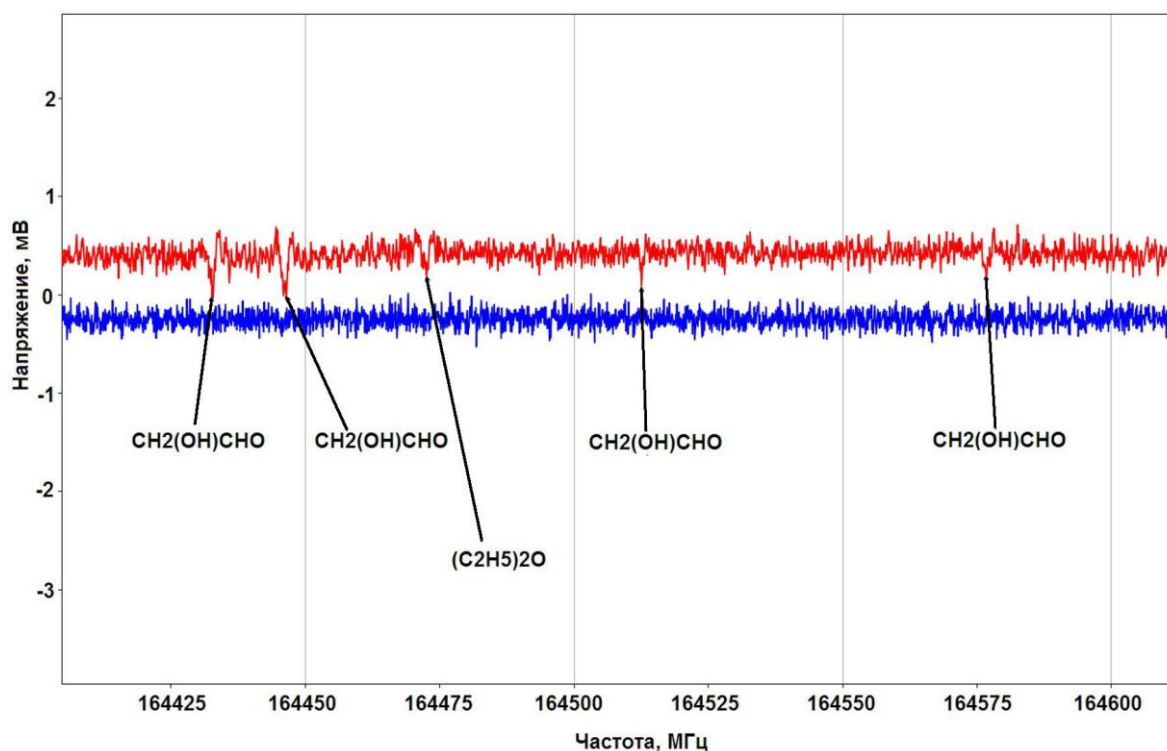


Рис. 3. Спектральный участок (В) для двух образцов мочи: РП (образец №15) (синий) и РПМ (образец №30) (красный) с четырьмя линиями поглощения гликоляльдегида ( $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$ ) с центральными частотами

$$f_{\text{эксп1}} = 164432.9 \text{ МГц} (f_{\text{кат1}} = 164432.5534 \text{ МГц}),$$

$$f_{\text{эксп2}} = 164446.5 \text{ МГц} (f_{\text{кат2}} = 164446.1844 \text{ МГц}),$$

$$f_{\text{эксп3}} = 164512.6 \text{ МГц} (f_{\text{кат3}} = 164512.3632 \text{ МГц}),$$

$$f_{\text{эксп4}} = 164576.8 \text{ МГц} (f_{\text{кат4}} = 164576.6031 \text{ МГц})$$

и диэтилового эфира ( $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$ ) с  $f_{\text{эксп}} = 164472.6 \text{ МГц}$  ( $f_{\text{кат}} = 164472.4515 \text{ МГц}$ ), зарегистрированными в образце РПМ и отсутствующими для РП.

Данные по центральным частотам из каталогов ( $f_{\text{кат}}$ ) приведены по [10, 11].

Для рисунков 2 и 3 квантовые числа переходов не приводятся, поскольку некоторые из зарегистрированных линий (например, для изоциановой кислоты) представляют собой огибающую для нескольких линий данного вещества, лежащих на расстояниях меньших ширины линии и поэтому не разрешающихся и представленных как одна линия поглощения.

Предварительные исследования [9] выявили вещества, появившиеся при терморазложении мочи в образцах как здоровых добровольцев, так и пациентов с онкологией предстательной железы. Эти же вещества появляются во всех образцах, рассматриваемых в данной работе. В дополнение к таким веществам, как вода (ее линий поглощения в рабочем диапазоне спектрометра нет), аммиак, изоциановая кислота (см. рис. 2), мочевины, которые присутствуют во



всех образцах как здоровых, так и больных пациентов, определенный ряд веществ присутствует в смеси, получающейся при нагревании мочи, в образцах здоровых пациентов. К этим веществам относятся пропандиол (см. рис. 2), фенол, метилфениловый эфир, метилформиат, пропаналь, бензальдегид, гликольальдегид (см. рис. 2 и 3), метилбутиронитрил, этинилбензонитрил, метилмеркаптан, аланин, этиленгликоль, метилкарбамат, цианоэтинилбензол, сероуглерод, сероводород, но концентрации некоторых из них варьируются в зависимости от состояния человека.

Анализ зарегистрированных спектров многокомпонентных газовых смесей, образующихся при нагревании исследуемых образцов мочи, позволил сделать следующие выводы относительно идентифицированных веществ. Пример сравнения некоторых метаболитов для трех образцов, представляющих все три рассматриваемых типа (РП, РПМ и ГП), приведен на рис. 4.

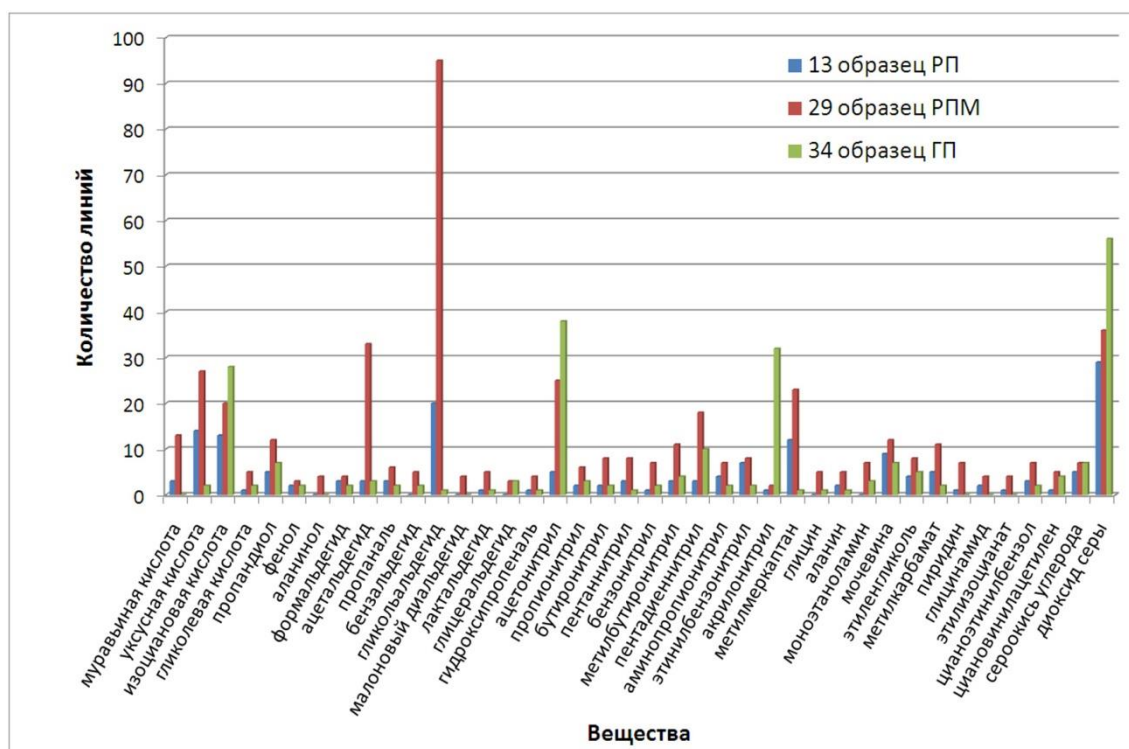


Рис. 4. Сравнительная диаграмма для ряда веществ в составе продуктов термического разложения мочи для трех образцов: РП (№13) (синий), РПМ (№29) (красный) и ГП (№34) (зеленый). Номера 13, 29 и 34 соответствуют порядковым номерам образцов, присвоенным в ходе исследования.

Следует отметить, что рис. 4 представляет неполный набор метаболитов, зарегистрированных в продуктах термического разложения. Некоторые

вещества, присутствующие в моче, содержат одну или несколько линий поглощения в рабочем диапазоне спектрометра, и сравнивать их можно не по количеству линий, а только по интенсивности линии. Кроме того, на этом рисунке показаны не все зарегистрированные вещества с большим количеством линий, а только те, которые наиболее показательны.

Некоторые вещества (например, изоциановая кислота, аммиак, мочеви́на, уксусная кислота и т.д.), как упоминалось выше, присутствуют в продуктах термического разложения всех типов образцов. Однако есть вещества, которые присутствуют в образцах РП и РПМ, но отсутствуют в образцах ГП или их концентрации в образцах ГП значительно ниже, чем в образцах РП и РПМ. Такие вещества можно рассматривать как потенциальные маркеры рака простаты. Сводная информация о веществах, идентифицированных в продуктах термического разложения мочи в образцах РП, РПМ и ГП (с использованием всех исследуемых образцов), представлена в таблице 1.

Таблица 1. Вещества, обнаруженные в продуктах термического разложения мочи в образцах рака предстательной железы (РП) без массажа, рака предстательной железы с массажем (РПМ) и гиперплазии предстательной железы (ГП).

Вещества, которые присутствуют в образцах всех типов	Вещества, которые присутствуют в образцах РП и РПМ, но отсутствуют в образцах ГП
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изоциановая кислота</li> <li>2. Уксусная кислота</li> <li>3. Пропандиол</li> <li>4. Ацетальдегид</li> <li>5. Ацетонитрил</li> <li>6. Метилбутиронитрил (его относительная концентрация в образцах РП и РПМ выше, чем в образцах ГП)</li> <li>7. Пентадиеннитрил (его относительная концентрация в образцах РП и РПМ выше, чем в образцах ГП)</li> <li>8. Этилбензонитрил (его относительная концентрация в образцах РП и РПМ выше, чем в образцах ГП)</li> <li>9. Метилмеркаптан (его относительная концентрация в образцах РП и РПМ выше, чем в образцах ГП)</li> <li>10. Аланин</li> <li>11. Мочевина (ее относительная концентрация в образцах РПМ выше, чем в образцах РП и ГП)</li> <li>12. Этиленгликоль</li> <li>13. Метилкарбамат</li> <li>14. Цианоэтилбензол</li> <li>15. Сероокись углерода</li> <li>16. Диоксид серы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Муравьиная кислота</li> <li>2. Фенол</li> <li>3. Метилфениловый эфир</li> <li>4. Пропаналь</li> <li>5. Бензальдегид</li> <li>6. Гликольальдегид (его относительная концентрация в образцах РП и РПМ выше, чем в образцах ГП)</li> <li>7. Малоновый диальдегид</li> <li>8. Бутиронитрил</li> <li>9. Пентаннитрил</li> <li>10. Метилизоцианат</li> </ol>

В таблице 1 представлены наборы веществ с учетом всех образцов всех исследуемых типов. Не все образцы содержат все вещества примерно в одинаковых концентрациях, поэтому внутри типа наблюдается вариация от образца к образцу. В таблице 1 представлены усредненные данные по всем образцам. Например, гликольальдегид, который обнаруживается в более высоких концентрациях у онкологических больных, что наглядно показано на рис. 4 для конкретных образцов с раком простаты, можно рассматривать как потенциальный маркер. С другой стороны, следует отметить, что несмотря на то, что появление фенола было зарегистрировано во всех образцах, показанных на рис. 4, на уровне одиночных линий поглощения (ниже 10 линий), в некоторых образцах с раком простаты фенол появляется в более высоких концентрациях, чем у пациентов без онкологии, поэтому его не следует исключать из списка потенциальных маркеров. Хотя однозначность использования веществ в качестве возможных маркеров онкологического заболевания требует дополнительных исследований.

Пример участка спектра, зарегистрированного на спектрометре с быстрым свипированием частоты для двух образцов (РП и ГП) с регистрацией линий поглощения как веществ, присутствующих во всех образцах (диоксид серы ( $\text{SO}_2$ )), так и веществ, отсутствующих в образцах ГП, но присутствующих в образцах РП, представлен на рис. 5.

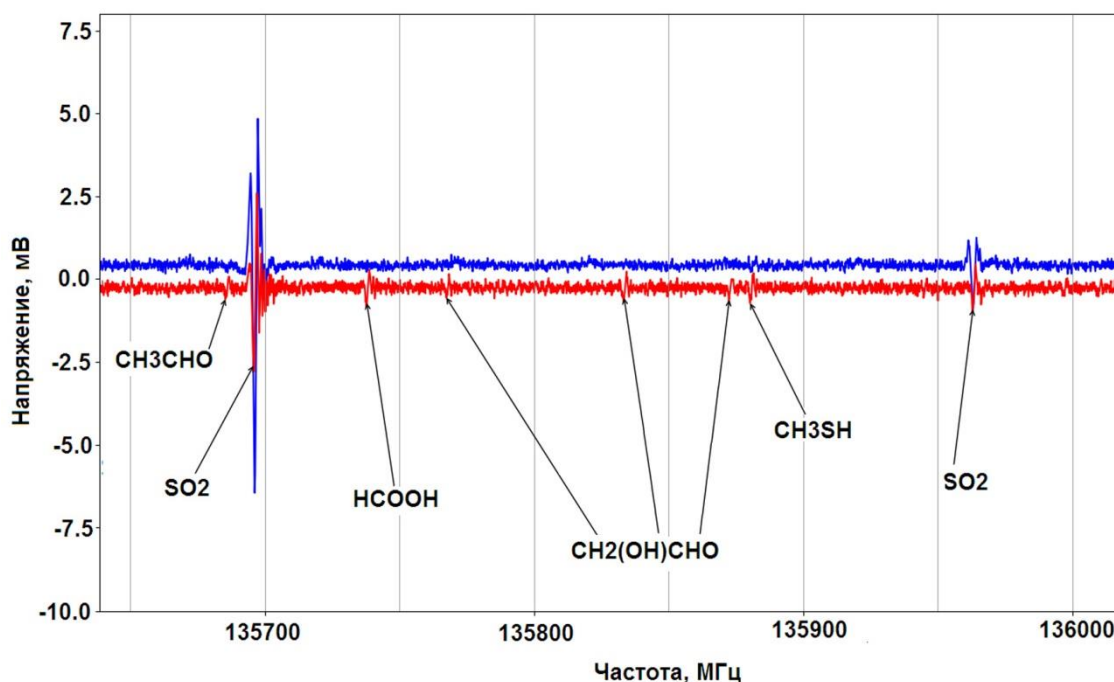


Рис. 5. Участок спектра, зарегистрированный на спектрометре с быстрым свипированием частоты для двух образцов (РП (№13) (- красный и ГП (№34) – синий) с записями линий поглощения веществ, как присутствующих во всех образцах (линии поглощения диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) с центральными частотами ( $f$ )  $f_{1\text{эксп}} = 135696,8$  МГц ( $f_{1\text{кат}} = 135696,02$  МГц),  $f_{2\text{эксп}} = 135963,1$  МГц ( $f_{2\text{кат}} = 135963,0$  МГц)), так и веществ, отсутствующих в образцах ГП, но присутствующих в образцах РП (ацетальдегида ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ )  $f_{\text{эксп}} = 135685,5$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 135685,4741$  МГц); муравьиной кислоты ( $\text{HCOOH}$ )  $f = 135737,7589$  МГц; гликольальдегида ( $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$ )  $f_{1\text{эксп}} = 135767,4$  МГц ( $f_{1\text{кат}} = 135767,4934$  МГц),  $f_{2\text{эксп}} = 135833,1$  МГц ( $f_{2\text{кат}} = 135833,3572$  МГц),  $f_{3\text{эксп}} = 135872,5$  МГц ( $f_{3\text{кат}} = 135872,5434$  МГц); метилмеркаптана ( $\text{CH}_3\text{SH}$ )  $f_{\text{эксп}} = 135880,3$  МГц ( $f_{\text{кат}} = 135880,4684$  МГц). Данные по центральным частотам ( $f_{\text{кат}}$ ) из каталогов приведены по [10, 11].

Следует отметить, что представленные данные показывают различия в составе продуктов термического разложения для образцов разного типа. Различия в составе и концентрации веществ, проявляющиеся разным количеством зарегистрированных линий на одном и том же спектральном участке, наблюдаются как при сравнении отдельных образцов, так и при сравнении средних значений полученных данных. Однако не все вещества демонстрируют примерно сопоставимое поведение для образцов одного типа. Некоторый разброс значений наблюдается, в частности, для неонкологических образцов. Как указано во введении, следует учитывать, что возраст больных

раком предстательной железы таков, что часто присутствуют сопутствующие заболевания, которые также влияют на состав метаболитов.

## **Заключение**

Таким образом, представлены результаты спектроскопических исследований многокомпонентных газовых смесей продуктов термического разложения образцов мочи больных раком предстательной железы, собранной без массажа, мочи больных раком предстательной железы, собранной с предварительным массажем, и мочи больных с гиперплазией предстательной железы. Выявлены составы веществ, образующихся при термическом разложении крупных молекул (белков, аминокислот и т.д.) мочи этих трех типов пациентов. Идентифицированы вещества, присутствующие в образцах мочи онкологических больных и отсутствующие в образцах мочи больных с гиперплазией предстательной железы. Эти вещества можно рассматривать как потенциальные маркеры рака предстательной железы. Полученные результаты могут стать первым шагом на пути к выявлению профиля вторичных метаболитов данной патологии в целом.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках госзадания (FFUF-2024-0024/).

## **Литература**

1. Llambrich M., Brezmes J., Cumeras R. The untargeted urine volatilome for biomedical applications: methodology and volatilome database // *Biological Procedures Online*. – 2022. – Т. 24. – №. 1. – С. 20.
2. Balk S.P., Ko Y.J., Bublely G.J. Biology of prostate-specific antigen // *Journal of clinical oncology*. – 2003. – Т. 21. – №. 2. – С. 383-391.
3. Höti N. et al. Urinary PSA and Serum PSA for Aggressive Prostate Cancer Detection // *Cancers*. – 2023. – Т. 15. – №. 3. – С. 960.
4. Yang B. et al. Novel metabolic signatures of prostate cancer revealed by <sup>1</sup>H-NMR metabolomics of urine // *Diagnostics*. – 2021. – Т. 11. – №. 2. – С. 149.

5. Ma Y. et al. Untargeted urine metabolite profiling by mass spectrometry aided by multivariate statistical analysis to predict prostate cancer treatment outcome // *Analyst*. – 2022. – Т. 147. – №. 13. – С. 3043-3054.
6. Vaks V. et al. Sensing nitriles with THz spectroscopy of urine vapours from cancers patients subject to chemotherapy // *Scientific Reports*. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 18117.
7. Вакс В.Л. и др. Спектроскопия высокого разрешения терагерцевого частотного диапазона для аналитических приложений // *Успехи физических наук*. – 2020. – Т. 190. – №. 7. – С. 765-776.
8. Vaks V. et al. Sensing nitriles with THz spectroscopy of urine vapours from cancers patients subject to chemotherapy // *Scientific Reports*. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 18117.
9. Vaks V. et al. Application of High-Resolution Terahertz Gas Spectroscopy for Studying the Composition of Thermal Decomposition Products in Human Urine of Prostate Cancer Patients // *Applied Sciences*. – 2024. – Т. 14. – №. 5. – С. 1955.
10. 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.
11. 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.

**Для цитирования:**

Вакс В.Л., Анфертьев В.А., Домрачева Е.Г., Черняева М.Б., Масленникова А.В., Атдуев В.А., Родионов М.А., Атдуев К.А. Анализ состава продуктов термического разложения мочи при раке предстательной железы и доброкачественной гиперплазии предстательной железы методом ТГц нестационарной спектроскопии // *Журнал радиоэлектроники*. – 2025. – №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.5>