

УДК 616.24-006.6-074:612.231

<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2025-4-87-94>

Диагностика рака легкого на основе анализа летучих маркеров в выдыхаемом воздухе

Родионов Е.О.^{1,2}, Подолько Д.В.¹, Обходский А.В.³, Обходская Е.В.⁴, Миллер С.В.¹, Кульбакин Д.Е.¹, Сачков В.И.⁴, Попов А.С.⁴, Лаконкин В.С.³, Чернов В.И.^{1,3,5}

¹ Научно-исследовательский институт (НИИ) онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр (НИМЦ) Российской академии наук
Россия, 634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5

² Сибирский государственный медицинский университет (СибГМУ)
Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ)
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ)
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

⁵ Национальный исследовательский центр (НИЦ) «Курчатовский институт»
Россия, 123098, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

РЕЗЮМЕ

Цель. Определить диагностическую эффективность разработанного газоаналитического сенсорного комплекса в сочетании с алгоритмами искусственной нейронной сети для выявления рака легкого по маркерным летучим органическим соединениям в выдыхаемом воздухе.

Материалы и методы. В исследуемую группу включены 53 пробы выдыхаемого воздуха от пациентов с морфологически подтвержденным раком легкого I–IV стадий. Контрольная группа ($n = 47$) состояла из лиц, не имеющих на момент включения в исследование признаков онкологических заболеваний по данным анамнеза и (или) предшествующих диагностических мероприятий. Исследование проводилось с помощью разработанного мультисенсорного газоаналитического комплекса, состоящего из набора полупроводниковых сенсоров и реализующего алгоритмы нейро-сетевой обработки данных.

Результаты. Полученные при проведении экспериментов по классификации пациентов с раком легкого и здоровых добровольцев результаты показывают наличие явных признаков различия в пробах выдыхаемого воздуха. Точность составила 95,8 %, чувствительность – 98,1% и специфичность – 93,6%. В серии экспериментов с равным распределением стадий (I–II и III–IV) средняя точность классификации составила 75%, чувствительность и специфичность – 65–80%. Подготовленные и неподготовленные пациенты демонстрировали сопоставимые результаты, что подтверждает воспроизводимость метода. Уровень точности 75% позволяет различать пробы от пациентов с ранними и поздними стадиями заболевания.

Заключение. Разработанный комплекс демонстрирует высокую диагностическую эффективность, превосходящую существующие методы, включая низкодозную компьютерную томографию. Полученные данные подтверждают перспективность технологии как для раннего выявления, так и для стадирования рака легкого.

Ключевые слова: рак легкого, выдыхаемый воздух, летучие органические соединения, сенсорный газоаналитический комплекс, неинвазивная диагностика, нейронная сеть

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

✉ Родионов Евгений Олегович, Rodionov_eo@oncology.tomsk.ru

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-15-00177, <https://rscf.ru/project/23-15-00177>.

Соответствие принципам этики. Все лица подписали информированное согласие на участие в исследовании. Исследование одобрено локальным этическим комитетом НИИ онкологии Томского НИМЦ (протокол № 3а от 25.03.2020).

Для цитирования: Родионов Е.О., Подолько Д.В., Обходский А.В., Обходская Е.В., Миллер С.В., Кульбакин Д.Е., Сачков В.И., Попов А.С., Лаконкин В.С., Чернов В.И. Диагностика рака легкого на основе анализа летучих маркеров в выдыхаемом воздухе. *Бюллетень сибирской медицины*. 2025;24(4):87–94. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2025-4-87-94>.

Lung cancer diagnosis based on the analysis of volatile markers in exhaled breath

Rodionov E.O.^{1,2}, Podolko D.V.¹, Obkhodskiy A.V.³, Obkhodskaya E.V.⁴, Miller S.V.¹, Kulbakin D.E.¹, Sachkov V.I.⁴, Popov A.S.⁴, Lakonkin V.S.³, Chernov V.I.^{1,3,5}

¹ Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences
5 Kooperativny St., 634009 Tomsk, Russian Federation

² Siberian State Medical University
2 Moskovsky trakt, 634050 Tomsk, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russian Federation

⁴ National Research Tomsk State University
36 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russian Federation

⁵ National Research Center «Kurchatov Institute»
1 Academician Kurchatov St., 123098 Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Aim. To evaluate the diagnostic accuracy of a developed gas analysis sensor system combined with neural network algorithms for detecting lung cancer based on volatile organic compounds in exhaled breath.

Materials and methods. The study group included 53 exhaled breath samples from patients with morphologically confirmed stage I–IV lung cancer. The control group ($n = 47$) consisted of individuals with no history or prior diagnostic findings of cancers at the time of enrollment. The study was conducted using the developed Multisensory Gas Analysis System, comprising an array of semiconductor sensors and implementing neural network data processing algorithms.

Results. The experimental results of classifying lung cancer patients and healthy volunteers demonstrated distinct differences in the exhaled breath samples. The system achieved the accuracy of 95.8%, sensitivity of 98.1%, and specificity of 93.6%. In a series of experiments with balanced stage distribution (stages I–II vs. stages III–IV), the mean classification accuracy was 75%, with sensitivity and specificity ranging from 65 to 80%. Both prepped and non-prepped patients showed comparable results, confirming the reproducibility of the method. The accuracy level of 75% allowed for the differentiation between early- and late-stage disease samples.

Conclusion. The developed system demonstrates high diagnostic performance, surpassing existing methods, including low-dose computed tomography. The findings support the potential of this technology for both early detection and staging of lung cancer.

Keywords: lung cancer, exhaled breath, volatile organic compounds, sensory gas analysis system, non-invasive diagnosis, neural network

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious or potential conflict of interest related to the publication of this article.

Source of financing. The research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-15-00177, available at <https://rscf.ru/project/23-15-00177>.

Conformity with the principles of ethics. All study participants signed an informed consent to participate in the study. The study was approved by the local Ethics Committee at Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Minutes No. 3a dated March 25, 2020).

For citation: Rodionov E.O., Podolko D.V., Obkhodskiy A.V., Obkhodskaya E.V., Miller S.V., Kulbakin D.E., Sachkov V.I., Popov A.S., Lakonkin V.S., Chernov V.I. Lung cancer diagnosis based on analysis of volatile markers in exhaled breath. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2025;24(4):87–94. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2025-4-87-94>.

ВВЕДЕНИЕ

Рак легкого представляет собой серьезную глобальную проблему здравоохранения, характеризующуюся высокой заболеваемостью и смертностью, что во многом связано с поздней диагностикой, когда болезнь часто достигает распространенных стадий [1, 2].

Традиционные методы медицинской визуализации часто не позволяют выявить заболевание на ранних, потенциально излечимых стадиях. В связи с этим существует острая потребность в неинвазивных, быстрых и экономически эффективных скрининговых инструментах, способных улучшить раннюю диагностику рака легкого и клинические исходы.

Анализ выдыхаемого воздуха – это перспективный неинвазивный диагностический метод, основанный на исследовании сложной смеси летучих органических соединений (ЛОС), содержащихся в выдохе человека, с целью получения информации о метаболическом состоянии организма. Данный метод базируется на предположении, что в процессе метаболизма образуются различные ЛОС, состав и концентрация которых могут изменяться при наличии патологических процессов, отражая происходящие изменения на клеточном и системном уровнях [3]. При раке легкого эти изменения обусловлены главным образом усилением окислительного стресса, воспаления и перекисного окисления липидов, что проявляется повышением уровня алканов, альдегидов, кетонов и спиртов. Эти вещества могут служить потенциальными биомаркерами для ранней диагностики, позволяя дифференцировать злокачественные и доброкачественные процессы, а также определять стадию болезни [4, 5]. Однако для внедрения метода в клиническую практику необходима тщательная валидация выявленных биомаркеров с учетом генетических, экологических и поведенческих факторов, которые могут влиять на их профиль в различных популяциях.

Традиционные методы идентификации отдельных ЛОС, такие как газовая хроматография или масс-спектрометрия, обладают высокой специфичностью, но требуют значительных временных и финансовых затрат. В отличие от них, электронный нос позволяет в режиме реального времени анализировать характерные профили ЛОС, что делает его перспективным инструментом для применения непосредственно в клинической практике. Эта технология особенно ценна для оперативной диагностики, поскольку сочетает высокую скорость анализа с возможностью выявления патологических изменений на ранних стадиях по характерным метаболическим «отпечаткам» в выдыхаемом воздухе [6].

Цель исследования – определение диагностической эффективности разработанного газоаналитического сенсорного комплекса в сочетании с алгоритмами искусственной нейронной сети для выявления рака легкого по маркерным летучим органическим соединениям в выдыхаемом воздухе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании по классификации пациентов с раком легкого и здоровых добровольцев в возрасте от 35 до 80 лет в период 2023–2025 гг. использовались верифицированные пробы выдыхаемого воздуха в количестве 100 штук. Они отобраны как достоверные из общего набора, насчитывающего более 250 проб выдоха. Все участники были распределены на две группы: основную (исследуемую) и контрольную. Исследование одобрено биоэтическим комитетом НИИ онкологии Томского НИМЦ (протокол № 3а от 25.03.2020). Все лица подписали информированное согласие на участие в исследовании.

В исследуемую группу были включены 53 пробы от пациентов с морфологически подтвержденным злокачественным новообразованием легкого I–IV стадий (T1–4N0–3M0–1). Контрольная группа ($n = 47$) состояла из лиц, не имеющих на момент

включения в исследование признаков онкологических заболеваний по данным анамнеза и (или) предшествующих диагностических мероприятий. В обе подгруппы включены пробы, полученные от подготовленных и неподготовленных добровольцев в соотношении в среднем 50 : 50%. При формировании исследуемых подгрупп основное внимание уделялось равномерному распределению количества проб между подгруппами и внутри каждой отдельной подгруппы по возрасту, полу, факту подготовки добровольца и пациента к отбору пробы и стадиям заболевания.

Критерии включения в исследование: гистологически верифицированный рак легкого (для исследуемой группы); отсутствие декомпенсированной соматической патологии; возраст старше 18 лет на момент проведения исследования. Критерии исключения: отказ пациента от участия в исследовании; указание на онкопатологию в анамнезе (для контрольной группы); возраст младше 18 лет; острая фаза инфекционного заболевания; антибиотикотерапия за последние 30 дней; декомпенсированная сопутствующая патология; беременность и лактация. Всем пациентам исследуемой группы, согласно клиническим рекомендациям по лечению и диагностике рака легкого, выполнено обследование с целью определения распространенности опухолевого процесса [7].

Согласно разработанной ранее методике отбора проб, в качестве образцов биоматериала для проведения экспериментальных исследований мы использовали выдыхаемый воздух [8]. Сбор выдыхаемого воздуха проводился в стерильные полимерные мешки объемом 5 л с использованием двух методик. Для получения подготовленных проб участники за 6 ч до анализа воздерживались от приема пищи (кроме воды), использования парфюмерно-гигиенических средств, курения и чистки зубов, при этом забор осуществлялся утром сразу после пробуждения. Неподготовленные пробы отбирались во второй половине дня без каких-либо ограничений в питании, гигиене или повседневной активности пациентов.

Исследование проводилось с помощью мультисенсорного газоаналитического комплекса, оснащенного 24 газовыми датчиками и одним датчиком влажности. Данный комплекс состоит из набора полупроводниковых сенсоров и реализует алгоритмы нейросетевой обработки данных. Обученная искусственная нейронная сеть распознает и отличает составные молекулярные паттерны, содержащиеся в образцах выдыхаемого воздуха пациентов с патологическими процессами от образцов выдыхаемого воздуха здоровых людей.

Использовалась искусственная нейронная сеть с архитектурой многослойного персептрона. Входные

данные представляли собой оцифрованные сигналы от полупроводниковых газовых сенсоров газоаналитического комплекса, сгруппированные по соответствующим классам обследуемых.

На обработку данные поступали сначала в виде XML-файлов (eXtensible Markup Language), каждому из которых соответствует одна проба выдыхаемого воздуха. Файл содержал информацию о результатах, измеренных датчиками, в виде набора целочисленных значений кодов аналого-цифрового преобразования с единым диапазоном изменения всех сигналов от 0 до 1023.

Поскольку XML-файл содержит большое количество данных, которые нецелесообразно применять в нейросетевой обработке в полном объеме, проводится их преобразование в единый текстовый файл. В текстовом файле содержится информация о количестве больных пациентов и здоровых добровольцев, участвующих в эксперименте, размерность входного и выходного слоя нейронной сети, массив данных, полученный отношением последней из десяти волн сигнала в режиме термоциклирования к первой волне. Так повторяется для всех подряд сенсоров и всех участвующих в процессе синтеза нейронной сети добровольцев. Чем больше данных о добровольцах включает текстовый файл, тем больше времени занимает проведение эксперимента.

Для одной настройки нейронной сети проводится более 10 опытов с генерацией ее параметров. В условиях эксперимента требовалось обучать и тестировать много нейронных сетей с различными параметрами, что также приводило к увеличению времени, затрачиваемого на проведение всей серии экспериментов. Для уменьшения объема данных без ущерба для точности нейронной сети массивы значений из исходных XML-файлов прореживались. Это позволило уменьшить размерность входного слоя нейронной сети в пять раз без потери качества ее работы. Таким образом, показания от каждого отдельного датчика включали по 18 значений, а по отдельной пробе выдыхаемого воздуха 432 значения. Таким образом, размерность входного слоя нейронной сети составляла 432, а размер выходного слоя – 2. В выходном слое нейронной сети возможны два случая: (1, 0) – доброволец здоров, (0, 1) – доброволец болен [8].

Визуализацию и оценку кластеризации многомерных данных выполняли с помощью алгоритма t-SNE (англ. t-distributed Stochastic Neighbor Embedding, стохастическое вложение соседей с t-распределением) [9], который проецирует высокоразмерные объекты в двумерное пространство, сохраняя топологические взаимосвязи. При этом схожие объекты отображаются близко расположенными точками, а

различимые – удаленными друг от друга. Качество классификации нейронной сети оценивали методом ROC-анализа (англ. receiver operating characteristic, рабочая характеристика приемника), что позволило объективно определить диагностическую эффективность предложенного подхода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении экспериментов по обучению нейронной сети были подобраны архитектура и гиперпараметры, которые обеспечивали процесс классификации проб выдыхаемого воздуха для двух наборов данных в среднем с точностью 92%. В отдельных опытах по формированию нейронной сети и ее обучению специфичность и чувствительность достигали 96%. В ходе предварительного анализа массивов значений с помощью диаграммы t-SNE-распределения с точечной визуализацией заметно значительное отличие проб выдыхаемого воздуха в двух подгруппах (рис. 1).

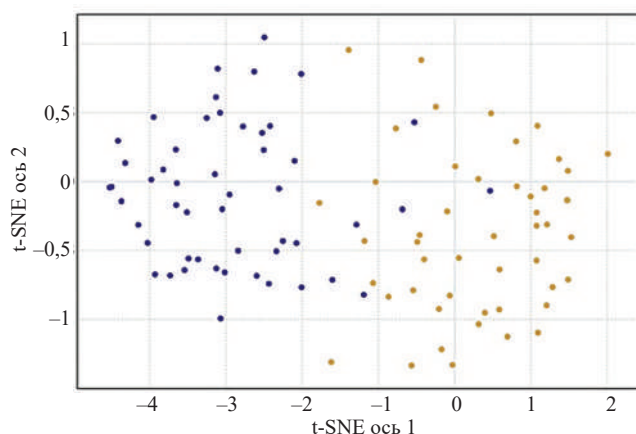


Рис. 1. Распределение проб выдыхаемого воздуха для здоровых добровольцев и пациентов с раком легкого по алгоритму t-SNE (алгоритм понижения размерности данных, определяющий расстояние между объектами как меру их сходства)

По результатам серии из 50 опытов по дифференцированию подгрупп здоровых добровольцев и пациентов с раком легкого среднее значение параметра AUC (англ. area under curve, площадь под кривой) превышало значение 0,9 и график ROC-кривой стремился к 1 (рис. 2), что говорит о наличии признака дифференцирования и эффективной работы модели нейронной сети для классификации набора проб выдыхаемого воздуха.

При оценке качества работы нейронной сети проводилась перекрестная проверка и определен оптимальный порог классификации на уровне 0,24, который обеспечивал установление равномерного баланса между ложноотрицательными и ложнополо-

жительными результатами при разном количестве проб в подгруппах. На рис. 3 представлены результаты проверки в виде диаграммы распределения проб от исследуемых подгрупп.

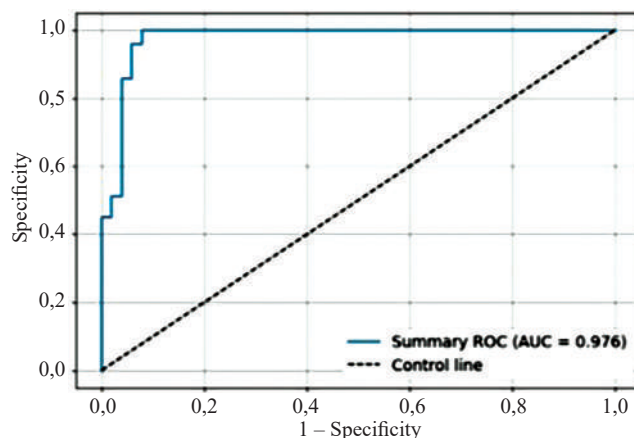


Рис. 2. Оценка качества обучения нейронной сети для классификации проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и пациентов с раком легкого

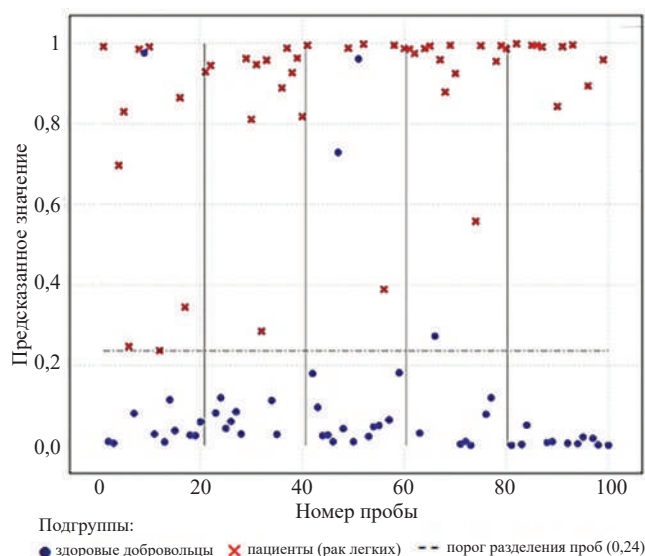


Рис. 3. Распределение проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и пациентов с раком легкого в результате проведения перекрестной проверки на всем наборе данных

Полученные при проведении экспериментов по классификации пациентов с раком легкого и здоровых добровольцев результаты показывают наличие явных признаков дифференцирования в пробах выдыхаемого воздуха. Точность составила 95,8%, чувствительность – 98,1% и специфичность – 93,6%. Это определяет перспективу дальнейшего развития и широкого применения метода диагностики рака легкого на основе анализа выдыхаемого воздуха в медицинской практике.

В рамках рассматриваемого исследования также проводились эксперименты по определению возможности дифференцирования проб выдыхаемого воздуха от 55 подготовленных и 54 неподготовленных пациентов с раком легкого. По результатам серии из 50 опытов среднее значение параметра AUC составило 0,7 и график ROC-кривой стремился к 1 (рис. 4). Средняя точность классификатора в серии этих опытов составила 65%, а показатели специфичности и чувствительности принимали значения в диапазоне от 60 до 72%. Полученные результаты показывают незначительное отличие состава выдыхаемого воздуха у подготовленных и неподготовленных пациентов с раком легкого и применение методики подготовки пациентов может позволить хоть и незначительно, но увеличить точность классификации проб выдыхаемого воздуха для подгрупп подготовленных здоровых добровольцев и пациентов с раком легкого. При таком подходе применение методики подготовки обследуемых людей, несомненно, приведет к усложнению процедуры отбора проб.

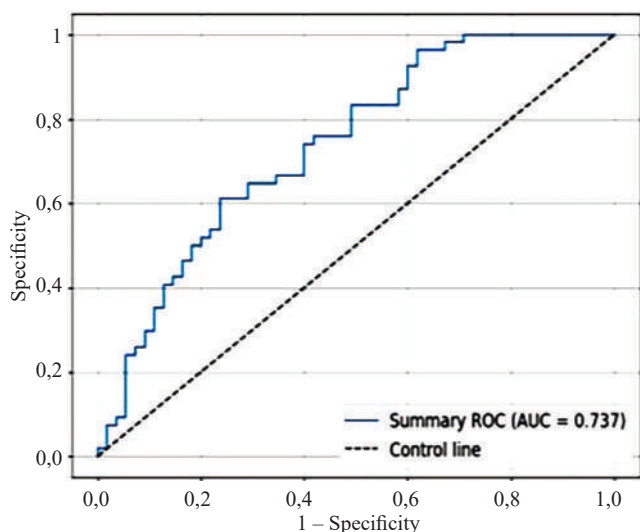


Рис. 4. Оценка качества обучения нейронной сети для классификации проб выдыхаемого воздуха от подготовленных и неподготовленных пациентов с раком легкого

Наряду с исследованием эффективности классификации проб от подготовленных и неподготовленных пациентов с раком легкого проводились численные эксперименты по выявлению схожести проб выдыхаемого воздуха от пациентов с раком легкого разных стадий. Набор исследуемых проб от пациентов с раком легкого разделялся на две подгруппы: с I–II стадией и III–IV стадией заболевания. Исследования проводились отдельно для подготовленных и неподготовленных пациентов с раком легкого.

В отдельных экспериментах для подготовленных и неподготовленных пациентов соотношение

количества проб I–II и III–IV стадий заболевания было одинаковым и составило 31 и 24 соответственно. Средняя точность классификатора в серии из 50 опытов составила 75%, а показатели специфичности и чувствительности распределены в диапазоне от 65 до 80%. Для подготовленных и неподготовленных пациентов были получены в среднем одинаковые показатели точности классификации, а также показатели специфичности и чувствительности. Достижение среднего значения точности классификации на уровне 75% показывает значительное отличие проб выдыхаемого для пациентов с раком легкого I–II и III–IV стадий. Эти результаты указывают на обеспечение дальнейшей возможности не только повышения точности метода выявления людей со злокачественными новообразованиями легкого на ранних стадиях, но и определения стадии заболевания при последовательном применении нейросетевых классификаторов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Стандартные методы ранней диагностики рака легкого включают рентгенографию органов грудной клетки и компьютерную томографию. Однако рентгенография, используемая для скрининга, характеризуется низкой чувствительностью и высоким процентом ложноотрицательных результатов из-за ограниченного качества изображений. Низкодозная компьютерная томография (НДКТ) обеспечивает более детальную визуализацию и обладает высокой диагностической ценностью [10]. Американское онкологическое общество рекомендует ежегодный скрининг с помощью НДКТ для пациентов высокого риска (курящих или бывших курильщиков) в возрасте 50–80 лет с индексом курения ≥ 20 пачек/лет, что позволяет снизить смертность на 20% по сравнению с рентгенографией [11].

Несмотря на доказанную эффективность НДКТ, метод имеет существенные ограничения, включая проблему гипердиагностики (выявление клинически незначимых изменений), высокую долю ложноположительных результатов, приводящих к ненужным инвазивным процедурам, а также необходимость привлечения мультидисциплинарной команды специалистов для интерпретации находок. Дополнительными препятствиями для широкого внедрения являются ограниченная доступность оборудования, необходимость в квалифицированном персонале и высокая стоимость скрининговых программ. Эти факторы существенно затрудняют реализацию массового скрининга рака легкого даже в странах с развитой системой здравоохранения [12].

Количественный и качественный анализ летучих органических соединений в выдыхаемом воздухе

рассматривается как перспективный неинвазивный метод ранней диагностики рака легкого. Электронный нос демонстрирует стабильно хорошие результаты в выявлении рака легкого в популяциях с низкой и средней распространенностью заболевания (5,4–22%) [13].

Все исследования, касающиеся немелкоклеточного и мелкоклеточного рака легкого, показали значимые результаты, хотя с широким разбросом показателей чувствительности (71–99%) и специфичности (13–100%) [6]. В сочетании с искусственным интеллектом (ИИ) электронный нос способен выполнять анализ в реальном времени и давать предиктивную оценку наличия опухолевого процесса [14]. Несмотря на эти достижения, сочетание ИИ и биосенсоров для скрининга рака легкого остается малоизученным, что требует дальнейших исследований для повышения их практической применимости в клинической практике. Недостаточная воспроизводимость, нестабильность отклика сенсоров и влияние внешней среды ограничивают их применение в клинической практике.

Разработанный мультисенсорный газоаналитический комплекс представляет собой биосенсорную систему, основанную на полупроводниковых материалах, интегрированную с модулями машинного обучения. В проведенном исследовании продемонстрировано, что комплекс обеспечивает очень высокие показатели чувствительности и специфичности (98,1 и 93,6% соответственно). Эти показатели превосходят как НДКТ (чувствительность ~93%, специфичность ~73%), так и существующие аналоги электронных носов.

По сравнению с НДКТ разработанный комплекс обладает несколькими существенными клиническими преимуществами: неинвазивность и отсутствие радиационной нагрузки, оперативность получения анализа, низкая стоимость одного теста, что позволяет делать массовый скрининг, возможность динамического мониторинга, включая повторные обследования без вреда для пациента. Кроме того, портативность устройства и простота эксплуатации позволяют применять его в амбулаторных и даже поликлинических условиях, включая труднодоступные регионы с ограниченными диагностическими возможностями.

Ключевым преимуществом комплекса является высокая селективность за счет многослойной архитектуры сенсорного массива, способной различать минимальные колебания в составе ЛОС. Использование алгоритмов с применением искусственного интеллекта на этапе обработки данных обеспечивает устойчивость к шумам и артефактам, а также адаптацию под различия в образах дыхания,

обусловленные индивидуальными особенностями пациентов (возраст, курение, сопутствующая патология). Валидация алгоритма в зависимости от подготовленности проб продемонстрировала устойчивость результатов и низкий уровень межсерийной вариабельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ выдыхаемого воздуха становится перспективным диагностическим инструментом для раннего выявления и мониторинга рака легкого, особенно на начальных стадиях заболевания. Разработанный сенсорный газоаналитический комплекс демонстрирует клинически значимое преимущество по сравнению с текущими методами раннего выявления рака легкого. Сочетание высокой точности, доступности и удобства использования делает его перспективным инструментом для внедрения в программы скрининга и персонализированной диагностики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Миллер С.В., Фролова И.Г., Величко С.А., Тузиков С.А., Байдала П.Г., Полищук Т.В. и др. Одиночные округлые образования в легком, тактика ведения. *Бюллетень сибирской медицины*. 2012;11(S1):80–82.
2. Bray F., Laversanne M., Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Soerjomataram I. et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J. Clin.* 2024;74(3):229–263. DOI:10.3322/caac.21834.
3. Binson V.A., Thomas S., Subramoniam M. Non-invasive detection of early-stage lung cancer through exhaled breath volatile organic compound analysis. *Med. Gas. Res.* 2025;15(2):198–199. DOI: 10.4103/mgr.MEDGASRES-D-24-00101.
4. Binson V.A., Mathew P., Thomas S., Mathew L. Detection of lung cancer and stages via breath analysis using a self-made electronic nose device. *Expert. Rev. Mol. Diagn.* 2024;24(4):341–353. DOI: 10.1080/14737159.2024.2316755.
5. Buma A.I.G., Muntinghe-Wagenaar M.B., van der Noort V., de Vries R., Schuurbijs M.M.F., Sterk P.J. et al. Lung cancer detection by electronic nose analysis of exhaled breath: a multicentre prospective external validation study. *Ann. Oncol.* 2025;31:S0923-7534(25)00125-5. DOI: 10.1016/j.annonc.2025.03.013.
6. Van der Sar I.G., Wijbenga N., Nakshbandi G., Aerts J.G.J.V., Manintveld O.C., Wijsenbeek M.S. et al. The smell of lung disease: a review of the current status of electronic nose technology. *Respir. Res.* 2021;22(1):246. DOI: 10.1186/s12931-021-01835-4.
7. Лактионов К.К., Артамонова Е.В., Борисова Т.Н., Бредер В.В., Бычков Ю.М., Владимиров Л.Ю. и др. Злокачественное новообразование бронхов и легкого. *Современная онкология*. 2022;24(3):269–304. DOI: 10.26442/18151434.2022.3.201848.
8. Chernov V.I., Choyzonov E.L., Kulbakin D.E., Menkova E.N., Obkhodskaya E.V., Obkhodskiy A.V. et al. Non-invasive di-

- agnosis of malignancies based on the analysis of markers in exhaled air. *Diagnostics*. 2020;10(11):934. DOI: 10.3390/diagnostics10110934.
9. Van der Maaten L.J.P., Hinton G.E. Visualizing high-dimensional data using t-SNE. *J. Machine Learning Res.* 2008;9:2579–2605.
10. Hunger T., Wanka-Pail E., Brix G., Griebel J. Lung Cancer Screening with Low-Dose CT in Smokers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Diagnostics*. 2021;11(6):1040. DOI: 10.3390/diagnostics11061040.
11. Wolf A.M.D., Oeffinger K.C., Shih T.Y., Walter L.C., Church T.R., Fontham E.T.H. et al. Screening for lung cancer: 2023 guideline update from the American Cancer Society. *CA Cancer J. Clin.* 2024;74(1):50–81. DOI: 10.3322/caac.21811.
12. Jonas D.E., Reuland D.S., Reddy S.M., Nagle M., Clark S.D., Weber R.P. et al. Screening for Lung Cancer With Low-Dose Computed Tomography: Updated Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force. *JAMA*. 2021;325(10):971–987. DOI: 10.1001/jama.2021.0377. PMID: 33687468.
13. Rocco G., Pennazza G., Tan K.S., Vanstraelen S., Santonico M., Corba R.J. et al. A real-world assessment of stage I lung cancer through electronic nose technology. *J. Thorac. Oncol.* 2024;19(9):1272–1283. DOI: 10.1016/j.jtho.2024.05.006.
14. Ng X.J.K., Mohd Khairuddin A.S., Liu H.C., Loh T.C., Tan J.L., Khor S.M. et al. Artificial intelligence-assisted point-of-care devices for lung cancer. *Clin. Chim. Acta.* 2025;570:120191. DOI: 10.1016/j.cca.2025.120191.

Вклад авторов

Родионов Е.О. – анализ и интерпретация данных, обработка материала, подготовка статьи. Подолько Д.В., Кульбакин Д.Е., Миллер С.В. – сбор материала, обработка результатов. Обходская Е.В., Обходский А.В. – разработка и технический дизайн аппаратной базы, интерпретация результатов. Сачков В.И., Чернов В.И. – анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания. Попов А.С. – разработка и технический дизайн аппаратной базы, интерпретация результатов. Лаконкин В.С. – анализ и интерпретация данных.

Информация об авторах

Родионов Евгений Олегович – канд. мед. наук, ст. науч. сотрудник, отделение торакальной онкологии, НИИ онкологии, Томский НИМЦ; доцент кафедры онкологии, СибГМУ, г. Томск, Rodionov_eo@oncology.tomsk.ru, 0000-0003-4980-8986

Подолько Данил Владиславович – врач-онколог, отделение торакальной онкологии, НИИ онкологии, Томский НИМЦ; доцент кафедры онкологии, СибГМУ, г. Томск, danya_95rid@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7725-176X>

Обходский Артем Викторович – канд. техн. наук, доцент, инженерная школа ядерных технологий, НИ ТПУ, г. Томск, art707@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3996-0573>

Обходская Елена Владимировна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, лаборатория химических технологий, химический факультет, НИ ТПУ, г. Томск, fil330a@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0708-7765>

Миллер Сергей Викторович – д-р мед. наук, зав. отделением торакальной онкологии, НИИ онкологии, Томский НИМЦ, г. Томск, millersv1309@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5365-9840>

Кульбакин Денис Евгеньевич – д-р мед. наук, зав. отделением опухолей головы и шеи, НИИ онкологии, Томский НИМЦ, г. Томск, kulbakin_d@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3089-5047>

Сачков Виктор Иванович – д-р хим. наук, зав. лабораторией химических технологий, химический факультет, НИ ТПУ, г. Томск, vicsachkov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7866-274X>

Попов Александр Сергеевич – мл. науч. сотрудник, лаборатория химических технологий, химический факультет, НИ ТПУ, г. Томск, popovas@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4323-1728>

Лаконкин Владислав Сергеевич – студент 4-го курса, отделение ядерно-топливного цикла, НИ ТПУ, г. Томск, vsl13@tpu.ru, <http://orcid.org/0009-0002-4008-1012>

Чернов Владимир Иванович – д-р мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. отделением радионуклидной терапии и диагностики, заместитель директора по научной и инновационной работе, НИИ онкологии, Томский НИМЦ; руководитель стратегической ставки «Инженерия здоровья», НИ ТПУ, г. Томск; начальник отдела развития радионуклидных технологий, Научно-образовательный медицинский центр ядерной медицины, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, chernov@tnimc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8753-7916>

(✉) Родионов Евгений Олегович, Rodionov_eo@oncology.tomsk.ru

Поступила в редакцию 30.06.2025;
одобрена после рецензирования 05.07.2025;
принята к публикации 09.09.2025