

© Д.Е. Кульбакин¹, В.И. Чернов^{1,3}, Е.А. Смолина¹, Е.Л. Чойнзонов¹,
 И.К. Федорова¹, Е.В. Обходская², А.В. Обходский^{2,3}, В.О. Цхай¹, Е.О. Родионов¹,
 С.В. Миллер¹, В.С. Лаконкин³, В.И. Сачков²

Возможности диагностики рака верхних дыхательных путей с помощью мультисенсорного газоаналитического комплекса и искусственного интеллекта. Результаты одноцентрового исследования

¹Научно-исследовательский институт онкологии — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук», г. Томск, Российская Федерация

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Российская Федерация

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Российская Федерация

© Denis E. Kulbakin¹, Vladimir I. Chernov^{1,3}, Ekaterina A. Smolina¹, Evgeny L. Choyznzonov¹,
 Irina K. Fedorova¹, Elena V. Obkhodskaya², Artem V. Obkhodskiy², Vladislav O. Tskhay¹,
 Evgeny O. Rodionov¹, Sergey V. Miller¹, Vladislav S. Lakonkin³, Victor I. Sachkov²

Diagnostic Potential of a Multisensor Gas Analysis System and Artificial Intelligence for Upper Respiratory Tract Cancer. A Single-Center Study Results

¹Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, the Russian Federation

²National Research Tomsk State University, Tomsk, the Russian Federation

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the Russian Federation

Актуальность. Диагностика опухолей гортани, полости рта и глотки по анализу выдыхаемого воздуха является перспективным неинвазивным направлением в онкологии. В основе метода лежит идея о том, что метаболизм раковых клеток отличается от здоровых, и отличия могут проявляться в образовании специфических летучих органических соединений.

Цель. Изучение диагностических возможностей сенсорного газоаналитического комплекса и искусственной нейронной сети при исследовании выдыхаемого воздуха, полученного от больных раком верхних дыхательных путей ранних (I–II) и распространённых (III–IV) стадий.

Материалы и методы. В исследование было включено 78 пациентов с раком полости рта, гортани и гортаноглотки, а также 47 здоровых добровольцев. Анализ проб проводился при помощи разработанного авторами диагностического прибора, который детектировал летучие соединения в выдыхаемом воздухе с помощью набора полупроводниковых сенсоров с последующим нейросетевым анализом данных.

Результаты. Эксперименты проводились с применением данных о выдыхаемом воздухе. Нейронная сеть классифицировала и выявляла пациентов больных раком верхних дыхательных путей всех стадий в эксперименте с 30 пациентами и 35 здоровыми добровольцами. Достигнутая специфичность составила 83 %, чувствительность — 93 %. В классификации пациентов с ранними (I–II) стадиями рака верхних дыхательных путей и распространёнными (III–IV) стадиями точность, специфичность и чувствительность составили 69, 6 и 81 % соответственно.

Заключение. Отмечена диагностическая точность на уровне 88 % разработанного метода неинвазивной диагностики рака верхних дыхательных путей всех (I–IV) стадий

Introduction. Exhaled breath analysis represents a promising non-invasive approach for diagnosing laryngeal, oral cavity, and pharyngeal cancers. This method is based on the premise that cancer cell metabolism differs from healthy cells, resulting in the production of specific volatile organic compounds.

Aim. To evaluate the diagnostic performance of a multisensor gas analysis system combined with an artificial neural network for detecting upper respiratory tract cancer at early (I–II) and advanced (III–IV) stages using exhaled breath samples.

Materials and Methods. The study included 78 patients with oral cavity, laryngeal, and hypopharyngeal cancers, along with 47 healthy volunteers. Breath analysis was performed using a custom-developed diagnostic device that detects volatile compounds through an array of semiconductor sensors, with subsequent data processing by a neural network.

Results. All experiments were conducted using exhaled air. The neural network demonstrated high performance in distinguishing cancer patients from healthy volunteers (n = 30 patients vs 35 controls), achieving 93 % sensitivity and 83 % specificity. For staging classification between early (I–II) and advanced (III–IV) disease, the system achieved 81 % sensitivity and 58 % specificity, with an overall accuracy of 69 %.

Conclusion. The developed non-invasive method achieved 88 % diagnostic accuracy for detecting upper respiratory tract cancer across all stages (I–IV) using exhaled breath samples.

по образцам выдыхаемого воздуха. Точность выявления пациентов с ранними (I–II) стадиями из всего набора пациентов с раком верхних дыхательных путей всех (I–IV) стадий на основании только выдыхаемого воздуха составила 69 %.

Ключевые слова: рак верхних дыхательных путей; неинвазивная диагностика; выдыхаемый воздух; сенсорная газоаналитическая система; нейронная сеть

Для цитирования: Кульбакин Д.Е., Чернов В.И., Смолина Е.А., Чойнзонов Е.Л., Федорова И.К., Обходская Е.В., Обходский А.В., Цхай В.О., Родионов Е.О., Миллер С.В., Лаконкин В.С., Сачков В.И. Возможности диагностики рака верхних дыхательных путей на ранних и распространенных стадиях с помощью мультисенсорного газоаналитического комплекса и искусственного интеллекта. *Вопросы онкологии*. 2025; 71(6): 00-00.-DOI: 10.37469/0507-3758-2025-71-6-OF-2419

✉ Контакты: Кульбакин Денис Евгеньевич, kulbakin_d@mail.ru

Введение

В общей структуре злокачественных новообразований опухоли головы и шеи составляют около 20 % [1, 2]. Ежегодно в мире регистрируется свыше 500 000 новых случаев злокачественных опухолей головы и шеи, от которых умирает более 270 000 человек [2]. Из всех опухолей головы и шеи около 75–90 % приходится на плоскоклеточный рак, который характеризуется высокой агрессивностью течения [3, 4]. Местнораспространенные (III–IV) стадии диагностируются у 60–70 % первичных больных раком головы и шеи. Более 60 % больных на момент постановки диагноза имеют регионарные метастазы [1, 2]. Поздняя диагностика отрицательно сказывается на выживаемости, и около 50 % пациентов умирают в течение первых 5 лет [4, 5]. Превалирующую группу опухолей головы и шеи составляют опухоли верхних дыхательных путей — полости рта, гортани, рото- и гортаноглотки. Больные опухолями верхних дыхательных путей представляют разнородную группу, различающуюся по локализации первичного опухолевого процесса, глубине инвазии в окружающие ткани, распространенности на регионарные лимфатические узлы, а также и по прогнозу заболевания [4]. Однако следует отметить общую проблему лечения злокачественных опухолей данной локализации, связанную в высокой социальной значимостью области верхних дыхательных путей и неизбежными значимыми функциональными (дыхание, речь, жевание, глотание) и косметическими потерями в результате комбинированного лечения местнораспространенных стадий [6]. Все вышеперечисленное определяет сложность лечения пациентов с местнораспространенными стадиями злокачественных опухолей верхних дыхательных путей и диктует необходимость разработки новых, эффективных методов ранней диагностики [4, 7].

The system demonstrated 69 % accuracy in specifically identifying early-stage (I–II) cancers within the full patient cohort.

Keywords: upper respiratory tract cancer; non-invasive diagnosis; exhaled air; sensor-based gas analyzer; artificial neural network

For Citation: Denis E. Kulbakin, Vladimir I. Chernov, Ekaterina A. Smolina, Evgeny L. Choyznzonov, Irina K. Fedorova, Elena V. Obkhodskaya, Artem V. Obkhodskiy, Vladislav O. Tskhay, Evgeny O. Rodionov, Sergey V. Miller, Vladislav S. Lakonkin, Victor I. Sachkov. Diagnostic potential of a multisensor gas analysis system and artificial intelligence for upper respiratory tract cancer. A single-center study results. *Voprosy Onkologii = Problems in Oncology*. 2026; 71(6): 00-00.-DOI: 10.37469/0507-3758-2025-71-6-OF-2419

В последнее время возрастает интерес к возможности диагностики рака верхних дыхательных путей по анализу газового состава выдыхаемого воздуха. Эта неинвазивная методика представляет значительный интерес как потенциальный скрининговый и диагностический инструмент, способный повысить выявляемость онкологических заболеваний на ранних стадиях [8, 9]. Целью данной работы стало изучение диагностических возможностей сенсорного газоаналитического аппарата и искусственной нейронной сети при исследовании образцов выдыхаемого газа, полученных у больных раком верхних дыхательных путей ранних (I–II) и распространенных (III–IV) стадий.

Материалы и методы

Исследование является нерандомизированным, одноцентровым, проспективным, и выполнено на базе НИИ онкологии Томского НИМЦ.

В работе проведено исследование проб выдыхаемого воздуха у 125 человек в возрасте от 22 до 95 лет. Все включенные в исследование лица были разделены на исследуемую и контрольную группы. Исследуемую группу представили больные с гистологически подтвержденным плоскоклеточным раком полости рта, гортани и гортаноглотки T1-4N0-3M0 стадии, ранее не получавшие специальное противоопухолевое лечение — 78 человек.

В исследуемой группе со злокачественной патологией преобладали пациенты мужского пола ($n = 52$; 67 %). Средний возраст пациентов исследуемой группы составил 61 год.

В свою очередь исследуемая группа была разделена на две подгруппы: больные I–II стадией — 32 пациента; больные III–IV стадией — 46 пациентов. Информация по взятым пробам в исследуемой группе представлена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика исследуемой группы — пациенты со злокачественными новообразованиями верхних дыхательных путей

Характеристики группы	Количество — n (%)
Мужчины	52 (67 %)
Женщины	26 (33 %)
Локализация:	
Полость рта	44 (56 %)
Гортань	29 (37 %)
Гортаноглотка	5 (7 %)
Стадии	
I–II стадия	32 (41 %)
III–IV стадия	46 (59 %)
Всего	78 (100 %)

Table 1. Baseline characteristics of patients with upper respiratory tract malignancies (n=78)

Characteristic	n (%)
Male	52 (67 %)
Female	26 (33 %)
Tumor Location:	
Oral cavity	44 (56 %)
Larynx	29 (37 %)
Hypopharynx	5 (7 %)
Disease Stage:	
Stage I–II	32 (41 %)
Stage III–IV	46 (59 %)
Total	78 (100 %)

В контрольную группу вошли 47 человек без наличия злокачественной патологии (анамнестически и на основании ранее проведенного дообследования, если таковое проводилось) на момент проведения исследования. Факт наличия злокачественного образования в анамнезе, а также проведение любого лечения по поводу злокачественной опухоли процесса, возраст до 18 лет, острый инфекционный процесс, проведение антибактериальной терапии, беременность или кормление грудью являлись критериями исключения из контрольной группы. В контрольной группе распределение по полу было практически равным: мужской пол — 24 (51 %), женский пол — 23 (49 %). Средний возраст участников контрольной группы составил 46 лет.

Пробы выдыхаемого воздуха в исследуемой и контрольной группах забирались в специальный пластиковый стерильный мешок объемом 5 л, как в утренние часы, сразу после пробуждения (до приема еды и использования средства личной гигиены, чистки зубов и курения), так и на фоне привычного образа жизни, питания и гигиены без ограничения перед сдачей пробы.

Авторами данной работы ранее проведено исследование, которое подтвердило отсутствие влияния способа забора проб выдыхаемого воздуха на результаты газоаналитического анализа [10].

Измерение отдельных компонентов газовой смеси в выдыхаемом воздухе проб пациентов, включенных в исследование, осуществлялось с помощью разработанного авторами исследования мультисенсорного газоаналитического комплекса, размещенного в отдельном помещении [11, 12].

При формировании наборов проб для экспериментов 1 и 2 из общего числа — 125, особое внимание уделялось их сбалансированности и равномерному распределению количества проб между подгруппами и внутри каждой отдельной подгруппы по возрасту, полу, стадиям опухолевого процесса, варианту забора проб (утренние часы и на фоне привычного образа жизни) и наличию дополнительных факторов риска (курение, сопутствующие заболевания). В результате «балансировки» общее количество проб выдыхаемого воздуха для каждого отдельного эксперимента разное и отличается от общего числа проб всего исследования.

На каждого исследуемого заполнялось информированное согласие и фиксировались основные исходные критерии: возраст, пол, локализация и стадия опухолевого процесса, гистологический тип, возможные сопутствующие заболевания.

В качестве метода статистического анализа в исследовании применялась нейронная сеть с архитектурой многослойный персептрон. На вход искусственной нейронной сети подавались массивы значений, соответствующие каждой отдельной группе обследуемых людей (классу). Массивы значений в свою очередь представляли собой оцифрованные значения сигналов с полупроводниковых неселективных газовых сенсоров, входящих в состав газоаналитического комплекса.

Оценка эффективности нейросетевой классификации проб выдыхаемого воздуха в экспериментах проводилась методом анализа ROC-кривой при проведении перекрестной проверки, в рамках которой также определялись показатели специфичности и чувствительности для 95 % доверительного интервала (ДИ).

Результаты

В рамках данной работы и эксперимента 1 проводилась оценка возможности классификации проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и от пациентов с раком верхних дыхательных путей всех стадий. Характеристики групп добровольцев, участвующих в эксперименте 1 приведены в табл. 2 (см. приложение онлайн).

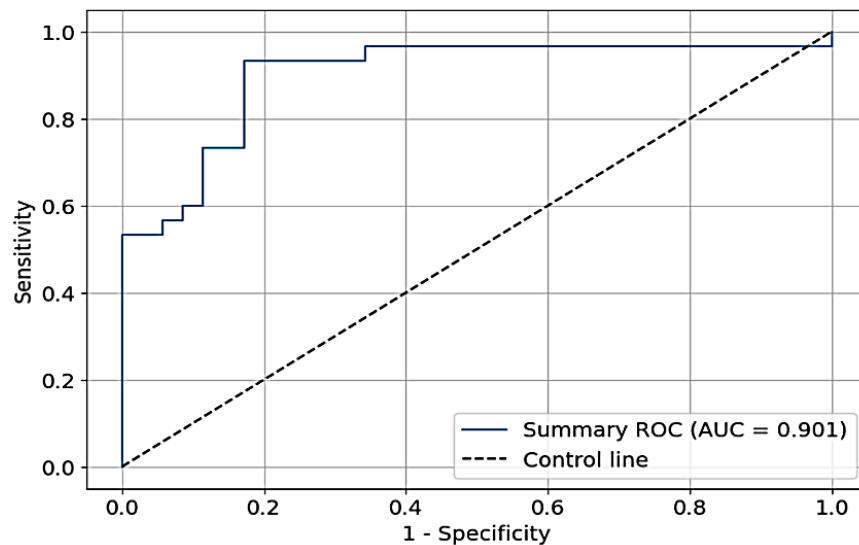


Рис. 1. График ROC-кривой по оценке качества обучения нейросетевого классификатора проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и пациентов с раком верхних дыхательных путей всех (I–IV) стадий
Fig. 1. ROC curve analysis of neural network performance for differentiating healthy volunteers from patients with upper respiratory tract cancer (Stages I–IV) using exhaled breath analysis

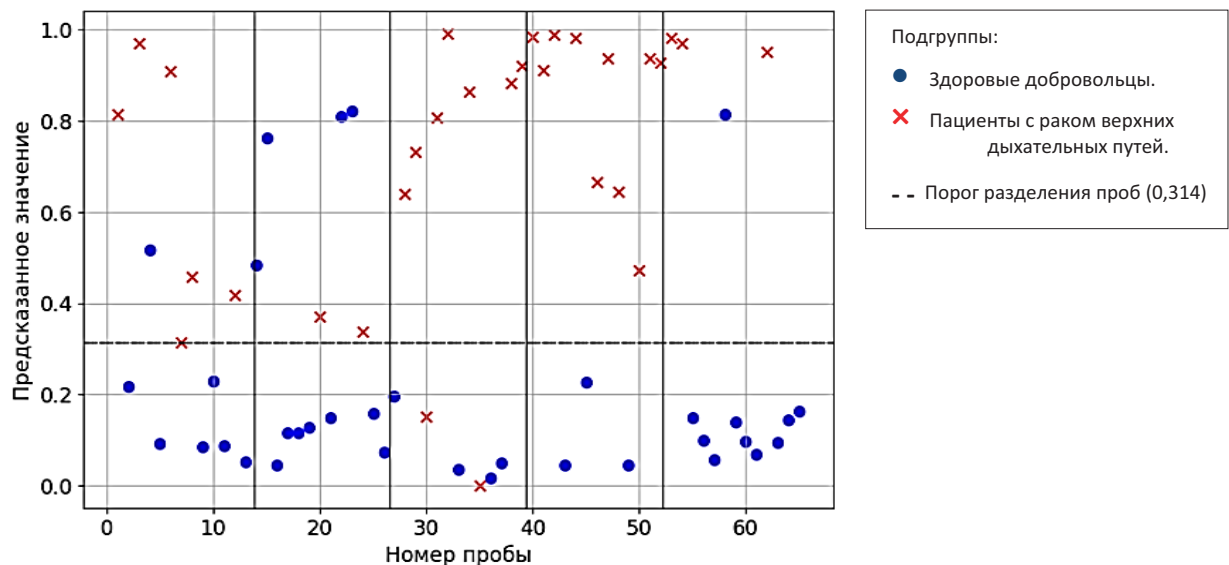


Рис. 2. Диаграмма распределения проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и пациентов с раком верхних дыхательных путей всех (I–IV) стадий
Fig. 2. Distribution of exhaled breath samples from healthy volunteers and patients with upper respiratory tract cancer (stages I–IV)

Значение достигнутой точности нейросетевого классификатора, по результатам серии из 50 выполненных опытов, составило 88 % (95 % ДИ [79 %, 95 %]), чувствительности — 93 % (95 % ДИ [82 %, 100 %]), специфичности — 83 % (95 % ДИ [69 %, 95 %]). Значение параметра AUC, по результатам серии опытов, составило 0,901 (95 % ДИ [0,805, 0,975]) (см. рис. 1). Это говорит о наличии признака дифференцирования и обеспечения возможности эффективной работы нейронной сети для классификации набора проб выдыхаемого воздуха.

В наборы данных для дифференцируемых подгрупп, с целью создания сопоставимых

групп, вошли 35 проб выдыхаемого воздуха от здоровых добровольцев и 30 проб от пациентов с раком верхних дыхательных путей. На рис. 2 представлены результаты проверки в виде диаграммы распределения проб от здоровых добровольцев и пациентов с раком верхних дыхательных путей.

В ходе оценки качества работы нейросетевого классификатора проводилась перекрестная проверка и определен оптимальный порог классификации на уровне 0,314, который обеспечивает установление равномерного баланса между ложноотрицательными (ЛЮ) и ложноположительными (ЛПП) результатами при разном количестве проб в подгруппах. Оптимальный порог

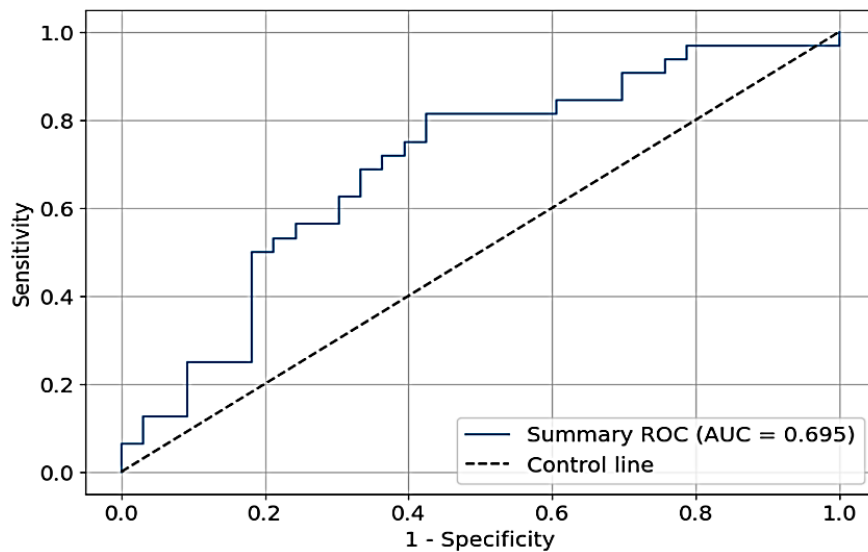


Рис. 3. График ROC-кривой по оценке качества обучения нейросетового классификатора проб выдыхаемого воздуха от пациентов с раком верхних дыхательных путей I–II и III–IV стадий

Fig. 3. ROC curve graph for assessing the quality of training of a neural network classifier of exhaled air samples from patients with upper respiratory tract cancer stages I–II and III–IV

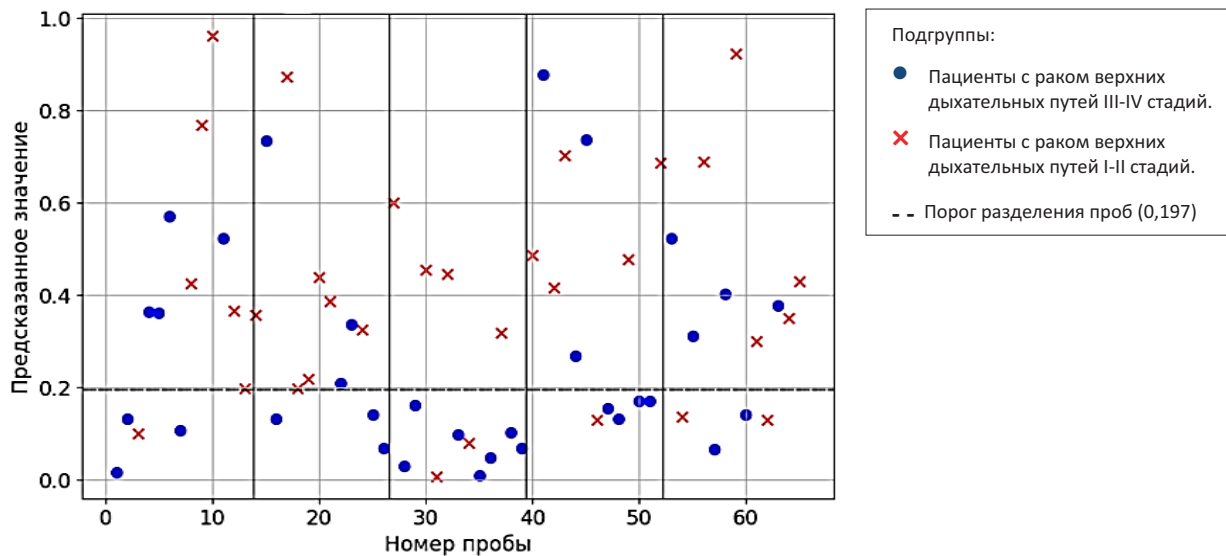


Рис. 4. Диаграмма распределения проб выдыхаемого воздуха от пациентов с раком верхних дыхательных путей ранних (I–II) и распространённых (III–IV) стадий

Fig. 4. Distribution of exhaled breath samples from patients with early-stage (I–II) versus advanced-stage (III–IV) upper respiratory tract cancer

разделения проб определен по табл. 3 (см. приложение онлайн), в которой приведены значения специфичности и чувствительности при различных порогах разделения проб.

Полученные результаты эксперимента 1 подтверждают наличие глобальных признаков дифференциации проб выдыхаемого воздуха от пациентов с раком верхних дыхательных путей всех (I–IV) стадий и здоровых добровольцев.

В ходе исследования проводился эксперимент 2 по оценке возможности выявления пациентов с раком верхних дыхательных путей на ранних стадиях. Характеристики групп добровольцев, участвующих в эксперименте 2, приведены в табл. 4 (см. приложение онлайн).

Значение достигнутой точности нейросетового классификатора, по результатам серии выполненных опытов, составило 69 % (95 % ДИ [57 %, 81 %]), чувствительности — 81 % (95 % ДИ [68 %, 94 %]), специфичности — 58 % (95 % ДИ [41 %, 73 %]). Значение параметра AUC, по результатам серии опытов, составило 0,695 (95 % ДИ [0,565, 0,814]), как показано на рис. 3. Это говорит о наличии слабого признака дифференциации и сравнительно низкой точности работы нейронной сети для классификации проб выдыхаемого воздуха от пациентов с раком верхних дыхательных путей ранних (I–II) и распространённых (III–IV) стадий при использовании данных только о составе выдыхаемого воздуха.

В наборы данных для дифференциации подгрупп вошли 32 пробы выдыхаемого воздуха от пациентов с раком верхних дыхательных путей I–II стадий и 33 пробы от пациентов III–IV стадий. На рис. 4 представлены результаты проверки в виде диаграммы распределения проб от здоровых добровольцев и пациентов больных раком верхних дыхательных путей.

Для оценки качества работы нейросетевого классификатора в эксперименте 2 определен оптимальный порог разделения проб на уровне 0,197. Значение оптимального порога определено по табл. 5 (см. приложение онлайн), в которой приведена зависимость специфичности и чувствительности от различных порогов разделения проб.

При применении метода диагностики рака верхних дыхательных путей по анализу выдыхаемого воздуха и эффективного выявления пациентов с ранними стадиями значение порога разделения проб в классификаторе эксперимента 2 может выбираться, исходя из повышения его чувствительности (см. табл. 5, приложение онлайн). В этом случае он должен работать последовательно с общим классификатором (эксперимент 1), у которого порог разделения проб здоровых добровольцев и пациентов со всеми стадиями заболевания должен определяется на уровне оптимального значения для обеспечения высокой точности диагностики на своем этапе.

Обсуждение

Ранняя диагностика злокачественных опухолей полости рта, гортани и глотки имеет решающее значение для улучшения прогноза и эффективности лечения [14]. Частое выявление опухолей гортани, полости рта и глотки на поздних стадиях связано с не специфичностью ранних симптомов (осиплость, дисфагия, хронический кашель или першением) [4, 6]. Также следует отметить, что в настоящее время не существует широкомасштабных скрининговых программ выявления рака верхних дыхательных путей на ранних стадиях, как, например, для рака молочной железы или шейки матки. С целью ранней диагностики опухолей верхних дыхательных путей используются стандартные и общепринятые методы обследования (клинический осмотр, эндоскопический осмотр, лучевые и морфологические методы диагностики), которые, как правило, ориентированы на лица из группы риска при появлении подозрительных клинических симптомов [15]. Также следует указать и низкую осведомленность врачей первичного звена (терапевты, семейные врачи) относительно ранних симптомов рака головы и шеи, недостаточное внимание к рутинному осмотру полости рта и глотки во время общих

медицинских осмотров. Данные факты усугубляются низкой осведомленностью населения о влиянии модифицирующих факторов риска развития рака верхних дыхательных путей (курение, алкоголь, ВПЧ). Опухоли данной локализации часто распространены среди населения с низким социально-экономическим статусом, что может быть связано с худшим доступом к медицинским услугам и менее здоровым образом жизни [6].

Ввиду чего одним из способов решения проблемы ранней эффективной диагностики опухолей верхних дыхательных путей, наряду с повышением осведомленности населения и медицинских работников относительно факторов риска и ранних симптомов развития злокачественных опухолей, может стать направление по разработке современных диагностических подходов с применением доступных, неинвазивных и эффективных методов ранней диагностики [16, 17].

В своём исследовании мы использовали метод диагностики, основанный на детекции высокоспецифичных биомаркеров опухолевого процесса в выдыхаемом воздухе и их последующем комплексном анализе. Основная концепция диагностики рака верхних дыхательных путей по анализу газового состава выдыхаемого воздуха была основана на том, что злокачественные клетки обладают измененным метаболизмом, что приводит к продукции и выделению в кровь и, соответственно, в выдыхаемый воздух, определенных летучих органических соединений или летучих биомаркеров, отсутствующих или присутствующих в иных концентрациях у здоровых людей. Эти соединения могут быть продуктами аномальных биохимических путей, окислительного стресса, воспалительных процессов или распада опухолевых клеток [8, 9, 18]. Анализ газового состава выдыхаемого воздуха является привлекательным подходом, поскольку он неинвазивен, дешев, относительно прост в выполнении и может быть применен для широкого скрининга населения.

В данной работе мы оценивали эффективность разработанного нами газоаналитического аппарата и искусственной нейронной сети при исследовании образцов выдыхаемого газа, полученных у больных раком полости рта, рото- и гортаноглотки, а также гортани ранних (I–II) и распространенных (III–IV) стадий.

Разработанный авторами данной работы мультисенсорный газоаналитический комплекс включал в себя 24 датчика для детекции различных летучих соединений, в т. ч. специфичных для опухолей головы и шеи — альдегиды (ацетальдегид, гексаналь, нонаналь), кетоны (ацетон, 2-бутанон), азотсодержащие соединения (аммиак, метиламин), углеводороды (изопрен, н-декан) и сернистые соединения (сероводород, диметилсульфид).

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало показатели точности, специфичности и чувствительности разработанного метода диагностики всех стадий рака верхних дыхательных путей — 88 % (95 % ДИ [79 %, 95 %]), 83 % (95 % ДИ [69 %, 95 %]) и 93 % (95 % ДИ [82 %, 100 %]) соответственно. Не менее важным являются полученные результаты о возможности диагностики рака верхних дыхательных путей на ранних (I–II) стадиях, которые продемонстрировали точность, специфичность и чувствительность — 69 % (95 % ДИ [57 %, 81 %]), 58 % (95 % ДИ [41 %, 73 %]) и 81 % (95 % ДИ [68 %, 94 %]) соответственно.

Можно заключить, что анализ газового состава выдыхаемого воздуха является перспективной областью исследований в онкодиагностике, особенно в части улучшения и развития для выявления ранних стадий опухолевого процесса [8, 9, 18]. Дальнейшие разработки и внедрение более чувствительных и специфичных аналитических методов и алгоритмов обработки данных, применение искусственного интеллекта и машинного обучения для многофакторного анализа данных, а также проведение масштабных клинических испытаний могут привести к созданию доступного и эффективного инструмента для ранней диагностики злокачественных опухолей верхних дыхательных путей и других локализаций, что в конечном счете позволит значительно улучшить прогноз и качество жизни пациентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии в статье конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Финансирование

Результаты получены в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 23-15-00177.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 23-15-00177).

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики

Все процедуры с вовлечением больных были проведены в соответствии с Хельсинкской декларацией по правам человека в редакции 2013 г. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом НИИ онкологии Томского НИМЦ (протокол № 3а от 25.03.2020). Все больные подписывали информированное согласие на участие в исследовании.

Compliance with patient rights and principles of bioethics

All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of Declaration of Helsinki Protocol (2013). The study protocol was approved by the local Ethics Committee of the Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center

(Protocol No. 3a, March 25, 2020). All patients gave written informed consent to participate in the study.

Участие авторов

Кульбакин Д.Е. — анализ и интерпретация данных, обработка материала, подготовка статьи, научное редактирование; Чернов В.И. — анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания; Смолина Е.А. — набор клинического материала, обработка результатов;

Чойнзонов Е.Л. — анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания; Федорова И.К. — набор клинического материала, обработка результатов;

Обходская Е.В., Обходский А.В. — разработка и технический дизайн аппаратной базы, интерпретация результатов; Цхай В.О. — набор клинического материала, обработка результатов;

Родионов Е.О., Миллер С.В. — анализ и интерпретация данных, обработка материала, набор клинического материала;

Лаконкин В.С. — обработка результатов;

Сачков В.И. — анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

Authors' contributions

Kulbakin D.E. — data analysis and interpretation, material processing, manuscript preparation, scientific editing;

Chernov V.I. — study analysis, critical revision of the manuscript for important intellectual content;

Smolina E.A. — clinical data collection, results processing;

Choyznzonov E.L. — study analysis, critical revision of the manuscript for important intellectual content;

Fedorova I.K. — clinical data collection, results processing;

Obkhodskaya E.V., Obkhodskiy A.V. — hardware system development and technical design, results interpretation;

Tshai V.O. — clinical data collection, results processing;

Rodionov E.O., Miller S.V. — data analysis and interpretation, material processing, clinical data collection;

Lakonkin V.S. — results processing;

Sachkov V.I. — study analysis, critical revision of the manuscript for important intellectual content.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. Состояние онкологической помощи населению России в 2023 году. Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. 2024: 262(илл.).-ISBN: 978-5-85502-297-1. [Ed. by A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shakhzadova. The state of oncological care for the population of Russia in 2023. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute — branch of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation. 2024: 262(ill.).-ISBN: 978-5-85502-297-1 (In Rus)].
2. Siegel R.L., Giaquinto A.N., Jemal A. Cancer statistics, 2024. *CA Cancer J Clin.* 2024; 74(1): 12-49.-DOI: <https://doi.org/10.3322/caac.21820>.
3. Laura Q.M., Chow, L.Q. Head and neck cancer. *N Engl J Med.* 2020; 382, 60-72.-DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMra1715715>.
4. Johnson D.E., Burtneess B., Leemans C.R., et al. Head and neck squamous cell carcinoma. *Nat Rev Dis Primers.* 2020; 6, 1-22.-DOI: <https://doi.org/10.1038/s41572-020-00224-3>.
5. Schutte H.W., Heutink F., Wellenstein D.J., et al. Impact of time to diagnosis and treatment in head and neck cancer: A systematic review. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020; 162, 446-457.-DOI: <https://doi.org/10.1177/0194599820906387>.

6. Patterson R.H., Fischman V.G., Wasserman I., et al. Global burden of head and neck cancer: Economic consequences, health, and the role of surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020; 162: 296-303.-DOI: <https://doi.org/10.1177/0194599819897265>.
7. Johnson D.E., Burtress B., Leemans C.R., et al. Head and neck squamous cell carcinoma. *Nat Rev Dis Primers.* 2020; 6: 92.-DOI: <https://doi.org/10.1038/s41572-020-00224-3>.
8. Abderrahman B. Exhaled breath biopsy: A new cancer detection paradigm. *Future Oncol.* 2019; 15: 1679-1682.-DOI: <https://doi.org/10.2217/fon-2019-0091>.
9. Belizário J.E., Faintuch J., Malpartida M.G. Breath biopsy and discovery of exclusive volatile organic compounds for diagnosis of infectious diseases. *Front Cell Infect Microbiol.* 2021; 10: 564194.-DOI: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.564194>.
10. Кульбакин Д.Е., Чойнзоннов Е.Л., Федорова И.К., et al. Оптимизация диагностики рака верхних дыхательных путей на основе газоанализа выдыхаемого воздуха. *Опухли головы и шеи.* 2024; 14(3): 14-21.-DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-1468-2024-14-3-14-21>. [Kulbakin D.E., Choinzonov E.L., Fedorova I.K., et al. Optimization of upper respiratory tract cancer diagnosis method based on exhaled breath gas analysis. *Opukholi Golovy i Shei = Head and Neck Tumors.* 2024; 14(3): 14-21.-DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-1468-2024-14-3-14-21> (In Rus)].
11. Chernov V.I., Choinzonov E.L., Kulbakin D.E., et al. Cancer diagnosis by neural network analysis of data from semiconductor sensors. *Diagnostics.* 2020; 10(9): 677.-DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics10090677>.
12. Кульбакин Д.Е., Чойнзоннов Е.Л., Федорова И.К., et al. Неинвазивная диагностика злокачественных новообразований верхних дыхательных путей на основе анализа маркеров в выдыхаемом воздухе. *Сибирский онкологический журнал.* 2023; 22(6): 7-15.-DOI: <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-6-7-15>. [Kulbakin D.E., Choinzonov E.L., Fedorova I.K., et al. Non-invasive diagnosis of upper airway malignancies based on the analysis of markers in exhaled air. *Siberian Journal of Oncology.* 2023; 22(6): 7-15.-DOI: <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-6-7-15> (In Rus)].
13. Pezzotti N., Lelieveldt B.P.F., Maaten L. van der, et al. Approximated and user steerable tSNE for progressive visual analytics. *IEEE Trans Vis Comput Graph.* 2016; 23(7): 1077-2626.-DOI: <https://doi.org/10.1109/tvcg.2016.2570755>.
14. Kumar P., Gupta S., Das B.C. Saliva as a potential non-invasive liquid biopsy for early and easy diagnosis/prognosis of head and neck cancer. *Transl Oncol.* 2024; 40: 101827.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranon.2023.101827>.
15. Guenette J.P. Radiologic evaluation of the head and neck cancer patient. *Hematol Oncol Clin North Am.* 2021; 35: 863-873.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hoc.2021.05.001>.
16. Idrees M., Farah C.S., Sloan P., et al. Oral brush biopsy using liquid-based cytology is a reliable tool for Oral cancer screening: A cost-utility analysis: Oral brush biopsy for oral cancer screening. *Cancer Cytopathology.* 2022; 130(9): 740-748.-DOI: <https://doi.org/10.1002/cncy.22599>.
17. Kok R., van Schaijik B., Johnson N.W., et al. Breath biopsy, a novel technology to identify head and neck squamous cell carcinoma: A systematic review. *Oral Dis.* 2023; 29(8): 3034-3048.-DOI: <https://doi.org/10.1111/odi.14305>.
18. Haripriya P., Rangarajan M., Pandya H.J. Breath VOC analysis and machine learning approaches for disease screening: a review. *J Breath Res.* 2023; 17(2).-DOI: <https://doi.org/10.1088/1752-7163/acb283>.

Поступила в редакцию / Received / 26.06.2025

Прошла рецензирование / Reviewed / 08.09.2025

Принята к печати / Accepted for publication / 25.09.2025

Сведения об авторах / Author Information / ORCID

Денис Евгеньевич Кульбакин / Denis E. Kulbakin / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3089-5047>; eLibrary SPIN: 3898-9456; Researcher ID (WOS): D-1151-2012; Author ID (Scopus): 55534205500.

Владимир Иванович Чернов / Vladimir I. Chernov / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8753-7916>; eLibrary SPIN: 6301-3612; Researcher ID (WOS): AAG-6392-2020; AuthorID (Scopus): 7201429550.

Екатерина Алексеевна Смолина / Ekaterina A. Smolina / ORCID ID: 0009-0003-3509-8706.

Евгений Лхаматценович Чойнзоннов / Evgeny L. Choinzonov / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3651-0665>; eLibrary SPIN: 2240-8730; Researcher ID (WOS): P-1470-2014; Author ID (Scopus): 6603352329.

Ирина Казановна Федорова / Irina K. Fedorova / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7540-8532>; eLibrary SPIN: 2761-7650; AuthorID (Scopus): 57574273000.

Елена Владимировна Обходская / Elena V. Obkhodskaya / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0708-7765>; eLibrary SPIN: 7284-7941; Researcher ID (WOS): E-4297-2014; Author ID (Scopus): 55830396600.

Артём Викторович Обходский / Artem V. Obkhodskiy / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3996-0573>; eLibrary SPIN: 3502-6532; Researcher ID (WOS): A-6040-2014; Author ID (Scopus): 57188992238.

Владислав Олегович Цхай / Vladislav O. Tskhay / ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3257-9002>; eLibrary SPIN: 6296-4573; ResearcherID (WOS): JWP-7896-2024.

Евгений Олегович Родионов / Evgeny O. Rodionov / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4980-8986>; eLibrary SPIN: 7650-2129; Researcher (WOS): B-7280-2017; Author ID (Scopus): 57189622130.

Сергей Викторович Миллер / Sergey V. Miller / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5365-9840>; eLibrary SPIN: 6510-9849; Researcher ID (WOS): C-8970-2012; Author-ID (Scopus): 56525429400.

Владислав Сергеевич Лаконкин / Vladislav S. Lakonkin / ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4008-1012>; Researcher ID (WOS): NOE-5489-2025.

Виктор Иванович Сачков / Victor I. Sachkov / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7866-274X>; eLibrary SPIN: 5661-0546; Researcher ID (WOS): E-4291-2014; Author ID (Scopus): 23009839000.

