

Научная статья
УДК 535.8
doi: 10.17223/7783494/1/10

Подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний с использованием инфракрасной и терагерцовой спектроскопии

Юрий Владимирович Кистенев¹, Игорь Тримасов²,
Александр Павлович Шкуринов³

^{1,2} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Москва, Россия

¹ yuk@iao.ru; ORCID: 0000-0001-5760-1462

² ORCID: 0000-0002-6156-2395

³ ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID: 0000-0002-6309-4732

Аннотация. Описаны методики оценки и определения стрессовых состояний. Рассмотрены существующие и перспективные инструментальные подходы бесконтактной диагностики стрессовых состояний. Описаны инструментальные методы пассивного терагерцового (ТГц) видения. Приведены примеры наиболее чувствительных инструментальных методов контроля летучих молекулярных биомаркеров в пробах выдыхаемого воздуха, такие как газовая хроматография с масс-спектрометрической детекцией, спектроскопия затухания излучения в кольцевом резонаторе, лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС), лидарный метод для дистанционного газоанализа в сочетании с инфракрасными (ИК) параметрическими генераторами света (ПГС), рассмотрены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: стресс, летучие молекулярные биомаркеры, выдыхаемый воздух, инфракрасная спектрометрия, терагерцовая спектрометрия

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Кистенев Ю.В., Тримасов И., Шкуринов А.П. Подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний с использованием инфракрасной и терагерцовой спектроскопии // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 71–81. doi: 10.17223/7783494/1/10

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/10

Approaches to non-contact diagnostics of stress conditions using infra-red and terahertz spectroscopy

Yury V. Kistenev¹, Igor Trimassov², Alexander P. Shkurinov³

^{1,2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

³ Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

¹ yuk@iao.ru; ORCID ID: 0000-0001-5760-1462

² ORCID ID: 0000-0002-6156-2395

³ ashkurinov@physics.msu.ru ORCID ID: 0000-0002-6309-4732

Abstract. The paper describes methods for assessing and determining stress conditions. The existing and promising instrumental approaches of contactless diagnostics of stress states are considered. Instrumental methods of passive terahertz (THz) vision are described. Examples of the most sensitive instrumental methods for monitoring volatile molecular biomarkers in exhaled air samples are given, such as gas chromatography with mass spectrometric detection, radiation attenuation spectroscopy in a ring resonator, laser optical-acoustic spectroscopy (LOAS), lidar method for remote gas analysis in combination with infra-red (IR) optical parametric oscillators (OPOs). Their advantages and disadvantages are considered.

Keywords: stress, volatile molecular biomarkers, exhaled air, infrared spectrometry, terahertz spectrometry

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Kistenev, Yu.V., Trimassov, I. & Shkurinov, A.P. (2023) Approaches to non-contact diagnostics of stress conditions using infra-red and terahertz spectroscopy. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 71–81. doi: 10.17223/7783494/1/10 (In Russian).

Введение

Стресс – это неспецифическая адаптивная реакция организма на внешнее воздействие (физическое или психологическое), нарушающая его гомеостаз, а также изменяющая состояние нервной системы или всего организма [1, 2]. Стрессы принято делить на физиологические и психологические. Последние, в свою очередь, подразделяются на информационные и эмоциональные. Длительный стресс может приводить к целому ряду осложнений – от метаболического синдрома до сердечно-сосудистых заболеваний, а также к фрустрациям и психическим расстройствам [3–7].

В 1990-х гг. был обнаружен эффект коллективной стрессорной реакции, проявляющийся в группах и популяциях [8, 9]. Этот эффект, названный групповым стрессом, состоял в том, что при значительном адаптационном напряжении для группы людей корреляции между их физиологическими параметрами увеличивались, а в ходе успешной адаптации – уменьшались. Таким образом, для компенсации стрессовых состояний необходимы методики оперативной детекции не только индивидуального, но и коллективного стресса. При разработке новых методов диагностики состояния для их валидации необходимо использовать стандартные методы решения той же диагностической задачи. Подходы, рутинно применяемые в клинической практике, могут использоваться как референсные.

В данном обзоре рассмотрены возможные референсные методики диагностики стресса, а также перспективные методы бесконтактного выявления стрессовых состояний с использованием ИК- и ТГц-спектроскопии.

1. Подходы к выявлению стрессовых состояний, применяемые в клинической практике

В клинической практике используют три класса методик диагностики стрессового состояния: физиологические, психофизиологические и психологические [10].

Физиологические методики выявления стрессовых состояний включают:

1. Оценку состояния центральной нервной системы путем анализа характерных паттернов на электроэнцефалограммах.
2. Оценку состояния вегетативной нервной системы путем регистрации:
 - кожно-гальванической реакции [11];
 - кожной температуры;
 - показателей состояния дыхательной системы (частота и глубина дыхания);
 - показателей состояния сердечно-сосудистой системы.

В настоящее время регистрация variability сердечного ритма считается наиболее информатив-

ным методом количественной оценки вегетативной регуляции сердечного ритма и функционального состояния организма. В этой области широко используется ряд параметров, являющихся производными классических статистических показателей (в частности, индекс напряжения), которые были предложены Р.М. Баевским [12]. Преимуществами кардиоинтервалометрии являются надежность (устойчивость к шумовой помехе), наличие четкой зависимости между системами организма и параметрами кардиоинтервалограммы, неинвазивность, объективность получаемых результатов, а также интегральность показателей, дающая возможность объективной оценки вегетативного гомеостаза [13]. С участием авторов была реализована методика биоуправления на основе мониторинга индекса напряжения, которая позволила производить оценку и коррекцию функционального состояния младших школьников [14].

3. Исследование биохимических показателей стресса:

- содержание катехоламинов, калия и натрия в слюне, что дополнительно отражает тип вегетативной нервной системы [15];
- биохимические показатели крови, которые, например, могут меняться при активизации коры надпочечников [16].

1.1. Психофизиологические методы выявления стрессовых состояний

Оценка характеристик нервной системы чаще всего осуществляется с помощью следующих психофизиологических методик [17]:

- определение скорости сложной зрительно-моторной реакции;
- теппинг-тест;
- определение критической частоты слияния мельканий или звуковых щелчков;
- двигательные методики.

Эффективность психических процессов в исследованиях стресса и адаптации к стрессовым состояниям чаще всего оценивается с помощью следующих методик:

- определение латентного периода восприятия времени;
- исследование устойчивости, объема, распределения и переключения внимания;
- исследование кратковременной зрительной памяти.

1.2. Психологические методики оценки стрессовых состояний и личностных характеристик

В этой области используют опросники личности, предназначенные для получения данных со слов ис-

пытуемых. Среди опросников наиболее популярен тест тревожности Спилбергера–Ханина [18]. Разработаны методики, основанные на шкалировании состояния, включая симптоматический опросник SCL-90-R (Symptom Checklist-90-Revised, «Шкала психологического стресса PSM-25», «Шкала воспринимаемого стресса-10» [10, 19]. Часто используются «цветовой тест» М. Люшера и его модификации.

В целом можно отметить, что психологические методики просты в использовании, не требуют сложного оборудования, но малопригодны для мониторинга стрессовых состояний в реальном режиме времени. Противоположная ситуация характерна для физиологических методик.

2. Инструментальные подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний

Доведен до уровня экспериментальных образцов ряд инструментальных подходов для дистанционной регистрации пульсовой и дыхательной волн, температуры на поверхности тела. К ним относятся применение алгоритмов компьютерного зрения для анализа видеоизображений [19, 20], использование СВЧ-радаров [21]. При соответствующей обработке данных пульса и дыхания подобные методы потенциально позволят оценивать стрессовые состояния.

Контроль паттернов дыхания может также проводиться на основе пассивной регистрации периодически меняющегося теплового сигнала с поверхности лица [22] или регистрации периодических изменений содержания CO_2 [23] в районе ноздрей.

Авторами предложен новый метод бесконтактной диагностики психоэмоционального состояния человека, основанный на регистрации ИК- и ТГц-изображений лица человека (далее – ИК-ТГц-изображения) [24, 25]. Данный метод позволяет учесть различные факторы, вызывающие локальные изменения температуры поверхности лица, включая дыхательные циклы, вариации кровотока при изменении тонуса кровеносных сосудов и мышц лица [26]. Разработанный алгоритм обработки изображений позволяет выделить из полного сигнала, воспринимаемого системой регистрации, информативный вклад ТГц-канала. Одновременная регистрация ИК-ТГц-изображений лица испытуемого и его психофизиологических показателей проводилась в ситуациях физического стресса (кратковременные интенсивные физические упражнения – функциональная проба «приседания»), электростимуляции и информационного стресса (когнитивная нагрузка – простые арифметические вычисления «в уме»). Полученные данные сравнивались с данными аналогичных измерений в спокойном состоянии. Показано с использованием кластерного анализа ИК-ТГц-изображений, что

возможно разделение испытуемых по типу реакций кровеносной системы в стрессовых состояниях.

Подход, основанный на регистрации летучих молекулярных биомаркеров (ЛМБ) в выдыхаемом воздухе, является очень привлекательным, поскольку технически несложно провести регистрацию выдоха как у отдельных испытуемых, так и группы людей, находящихся в помещении. Данный подход активно развивается для диагностики различных заболеваний [27–29], однако на текущий момент в литературе представлено небольшое число работ по его использованию для мониторинга стрессовых состояний. В основе данного подхода лежат взаимосвязи между профилем метаболитов в биотканях, биологических жидкостях и выдыхаемом воздухе. В работе [30] представлен справочник по летучим органическим веществам, содержащимся в слюне (359 молекул), крови (154 молекулы), кожных выделениях (532 молекулы), выдыхаемом воздухе (872 молекулы), моче (279 молекул), фекалиях (381 молекула). Показано, что ряд молекул (ацетальдегид, 2-пропанон (ацетон), бензальдегид, 1-бутанол, 2-бутанон, гексанал, гептанал, октанал, пентанол, бензол, стирол, толуол) присутствует во всех субстанциях.

В работе [31] представлены результаты исследования состава воздуха в кинотеатре в процессе демонстрации различных эмоциональных событий на экране. Эти события сопровождались выбросом специфических химических веществ, в частности, обнаружена корреляция содержания CO_2 , изопрена, ацетона, метанола, ацетальдегида, 2-фуранона и бутадиена в кинозале, и демонстрацией эмоциональных сцен.

Проведено исследование молекулярных профилей дыхания при стрессе, индуцированном темповыми арифметическими вычислениями [32]. Пробы выдыхаемого воздуха были собраны у 22 участников (10 мужчин и 12 женщин) после двух эмоциональных воздействий: восприятие спокойной классической музыки и указанных выше арифметических вычислений. В качестве референтного метода использовалась регистрация сердечно-сосудистых реакций. Анализ проб выдыхаемого воздуха проводился методом термодесорбционной газовой хроматографии–масс-спектрометрии. Было выявлено 6 специфических для стрессового состояния ЛМБ: индол, 2-гидрокси-1-фенилэтанон, бензальдегид, 2-этилгексан-1-ол, 2-метилпентадекан и неидентифицированная компонента, которые позволили детектировать стресс с чувствительностью 83,3% и селективностью 91,6% для женщин и со 100% чувствительностью и 90% селективностью для мужчин.

В работе [33] представлены результаты анализа испарений с кожи при наличии стресса, вызванного

темповыми арифметическими вычислениями, аналогично [32]. Выявленные маркеры стресса: бензойная кислота, п-декановая кислота, изомер ксилола и 3-карен.

Среди выявленных в экспериментах ЛМБ, ассоциированных со стрессом, также представлены NO, изопрен, терпен, n-пропанол [34].

2.1. Инструментальные методы детектирования температурных 2D-профилей лица

Основными требованиями к таким системам являются чувствительность, малый уровень собственных шумов, работа при комнатных температурах, в крайнем случае – замкнутый контур охлаждения. Пространственное разрешение не является существенным фактором, поскольку размер отдельных текстур 2D-температурных профилей лица составляет несколько мм. Для пассивной регистрации

2D-изображений в ТГц-диапазоне широко используются матричные приемники на основе микроболометров [35]. Например, матрица 320×240 микроболометров V-T0831C (NEC, Япония) работает в диапазоне 1–30 ТГц, обладает пределом детектирования на уровне 100 пВт на частоте 1 ТГц и 30–50 пВт на частотах от 4 ТГц [36]. Суб-ТГц-камера, разработанная компанией Terasense Group, Inc. (США), состоит из массива (32 × 32) пиксельных детекторов, работающих при комнатной температуре, имеет мощность шума $1 \text{ нВт}/(\text{Гц})^{1/2}$ в диапазоне 0,01–1 ТГц, чувствительность 50 кВ/Вт, дифференцирует различие в 20% мощности падающего на соседние детекторы излучения, способна регистрировать до 50 кадров в секунду [37]. Пример регистрации температуры лица для разных фаз дыхательного цикла с использованием матрицы микроболометров V-T0831C представлен на рис. 1.

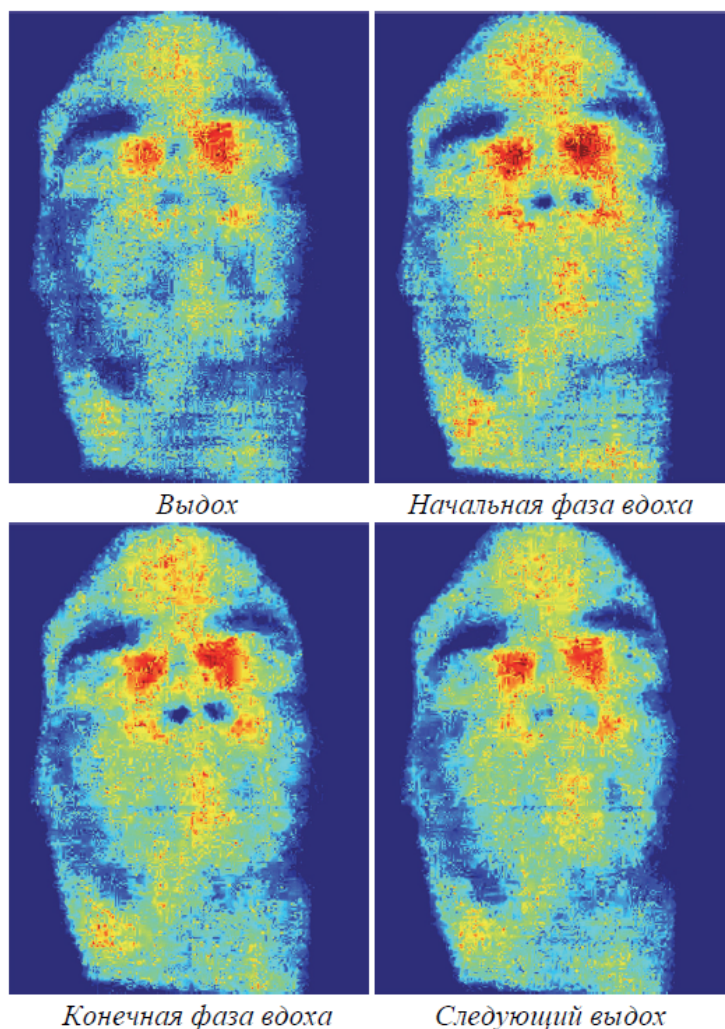


Рис. 1. Пример регистрации температуры лица для разных фаз дыхательного цикла с использованием матрицы микроболометров V-T0831C [25]

Fig. 1. An example of a face temperature registration for different phases of the respiratory cycle using a microbolometer matrix V-T0831C [25]

Структуры на сверхрешетках с квантовыми точками обеспечивают максимальную чувствительность среди фотоэлектронных приборов и свободны от принципиального недостатка квантовых ям, которые не восприимчивы к нормально падающим фотонам [38, 39].

В целом температура 50–60 К является критической с точки зрения чувствительности тепловых и фотонных детекторов в дальнем ИК-диапазоне: выше нее, особенно при комнатной температуре, тепловые приемники имеют существенные преимущества и наоборот [40].

2.2. Инструментальные методы контроля профиля летучих молекулярных маркеров в пробах выдыхаемого воздуха

Газовая хроматография с масс-спектрометрической детекцией (ГХ-МС) является золотым стандартом для анализа следовых количеств веществ, особенно органических в газовых смесях биологического происхождения. Метод имеет чувствительность на уровне 0,1 ppt [41]. Существуют приборные модификации ГХ-МС, например, масс-спектрометрия на основе выделения потоков ионов (Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry – SIFT-MS), спектрометрия подвижности ионов (Ion Mobility Spectrometry – IMS), масс-спектрометрия на основе реакции переноса протонов (Proton-transfer-reaction mass spectrometry – PTR-MS) [42–44]. Данный класс методов очень полезен на этапе выявления отдельных ЛМБ, но сложен в рутинных измерениях, не все варианты технической реализации позволяют проводить оперативный контроль проб выдыхаемого воздуха.

Электрохимические сенсоры основаны на изменении электрических свойств электродов за счет химических реакций в контакте с анализируемым газом. Высокий практический потенциал имеют устройства, состоящие из набора сенсоров, каждый из которых реагирует на отдельное вещество или группу веществ (технология «электронный нос»). Примером является устройство Cuganose 320, состоящее из 32 полимерных хемистезисторов, по-разному реагирующих на наборы ЛМБ [45–49]. Недостатками химических сенсоров являются низкая селективность анализа, особенно для сложных газовых смесей, короткий срок службы.

Анализ характеристик спектрометров, используемых для анализа выдыхаемого воздуха, представлен в [50]. Наиболее чувствительными методами локального газоанализа являются метод спектроскопии затухания излучения в кольцевом резонаторе (Cavity ring down spectroscopy – CRDS) и лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС). Чув-

ствительность CRDS может достигать $\sim 10^{-10}$ см⁻¹ при использовании зеркал в измерительной ячейке с коэффициентом отражения $R \geq 0,9999$. Существенным ограничением метода является техническая сложность перестройки длины волны в принципе, что связано с тем, что высокий коэффициент отражения достигается только в узком спектральном интервале [51].

ЛОАС обеспечивает порог обнаружения на уровне pptv [52]. Поскольку оптико-акустический сигнал пропорционален поглощенной газовой пробой энергии лазерного излучения, при реализации данного метода желательно использовать мощные источники лазерного излучения. Наряду с лазерами при реализации метода ЛОАС в ИК-диапазоне используются параметрические генераторы света (ПГС), которые также обеспечивают плавную перестройку в широком диапазоне [53]. В соответствии с литературными данными, наиболее часто используемые ПГС обеспечивают мощность от нескольких сотен мВт до единиц Вт и область перестройки 2–4 мкм [54–56]. Принцип лазерного оптико-акустического детектирования использован компанией ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск) при разработке газоанализатора LaserBreeze, который включает в себя источник излучения на основе ПГС с перестройкой длины волны от 2,5 до 10,7 мкм с накачкой Nd:YLF лазером на длине волны 1,053 мкм, разработанный с участием авторов [55–59]. Столь широкая перестройка длины волны достигнута путём использования в источнике лазерного излучения двух нелинейных кристаллов. При этом генерация излучения в диапазоне от 2,5 до 4,5 мкм обеспечивается за счёт использования периодически поляризованной структуры ниобата лития, легированного оксидом магния MgO:PPLN. В спектральном диапазоне 4,3–10,7 мкм генерация реализуется за счёт использования в резонаторе ПГС халькогенидного монокристалла тиагаллата ртути HgGa₂S₄ (HGS). Недостатком ПГС является достаточно большая спектральная ширина линии генерации. Пример регистрации спектра поглощения искусственной газовой смеси газоанализатором LaserBreeze представлен на рис. 2.

Реализация лидарного метода для дистанционного газоанализа с использованием ПГС может обеспечить контроль коллективного стресса посредством регистрации ЛМБ в помещении. Реализация лидара с использованием ПГС на основе кристалла КТА с диапазоном перестройки 3–4 мкм представлена в работах [55, 59, 60]. Дистанционный компонентный анализ газовых проб с использованием лидаров может проводиться на основе метода дифференциального поглощения (differential absorption lidar, DIAL) [61, 62].

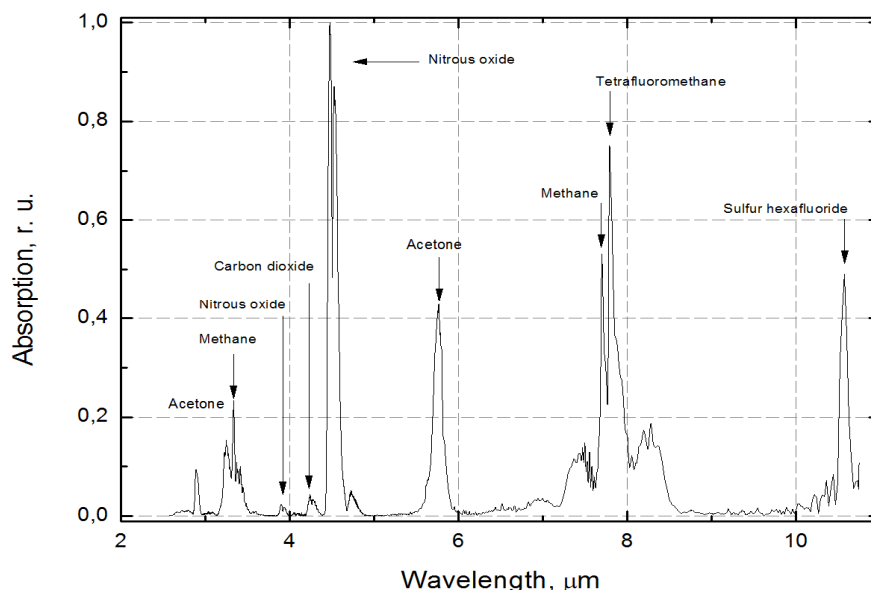


Рис. 2. Пример регистрации спектра поглощения искусственной газовой смеси газоанализатором LaserBreeze

Fig. 2. An example of registration of an artificial gas mixture absorption spectrum by the LaserBreeze gas analyzer

Данный метод в последние годы существенно изменился: для идентификации и определения концентраций молекулярных компонент используется измерение поглощения атмосферы на большом количестве длин волн (до нескольких сотен) [63]. Подобная методика потенциально позволяет идентифицировать одновременно уже десятки газов [64]. Данный метод получил название метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (differential optical absorption spectroscopy, DOAS) [63]. Отметим, что недостатком метода является отсутствие критериев о том, какие и сколько компонент необходимо учитывать при минимизации целевой функции.

Заключение

Для бесконтактного выявления стрессовых состояний перспективно использование температурных паттернов лица испытуемого, а также летучих молекул-биомаркеров стресса в выдыхаемом возду-

хе. Для повышения точности диагностики возможна комбинация обоих подходов. Реализация первого подхода может быть основана на регистрации ИК-ТГц-изображений лица человека. При создании подобных систем, работающих при комнатной температуре, оптимально использовать тепловые матричные приемники. Реализация второго подхода может быть основана на использовании набора химических датчиков или методов лазерной абсорбционной спектроскопии. Следует отметить, что лишь лидарный вариант молекулярной спектроскопии позволяет контролировать коллективный стресс.

При выборе референсного клинического метода целесообразно ориентироваться на инструментальные количественные методы, такие как кардиоинтерваломерия, регистрацию биохимических показателей стресса в биологических жидкостях, психофизиологических реакций организма на внешние воздействия.

Список источников

1. Nitsch J.R. Zur Gegenstandsbestimmung der Stressforschung // Stress: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen. 1981. P. 29–51.
2. Russell E., Koren G., Rieder M., Uum S. Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered questions // Psychoneuroendocrinology. 2012. V. 37(5). P. 589–601. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2011.09.009
3. Stewart W.F., Ricci J.A., Chee E., Hahn S.R., Morganstein D. Cost of lost productive work time among US workers with depression // Jama. 2003. V. 289(23). P. 3135–3144. DOI: 10.1001/jama.289.23.3135
4. Pardon M.C., Marsden C.A. The long-term impact of stress on brain function: from adaptation to mental diseases // Neuroscience and biobehavioral reviews. 2008. V. 32. P. 1071–1072. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.05.013
5. Bergmann N., Gyntelberg F., Faber J. The appraisal of chronic stress and the development of the metabolic syndrome: a systematic review of prospective cohort studies // Endocrine connections. 2014. V. 3(2) P. R55–R80. DOI: 10.1530/EC-14-0031
6. Machado A., Herrera A.J., de Pablos R.M., Espinosa-Oliva A.M., Sarmiento M., Ayala A., Cano J. Chronic stress as a risk factor for Alzheimer's disease // Reviews in the Neurosciences. 2014. V. 25(6). P. 785–804. DOI: 10.1515/revneuro-2014-0035
7. Golbidi S., Frisbee J.C., Laher I. Chronic stress impacts the cardiovascular system: animal models and clinical outcomes // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. 2015. V. 308(12). P. H1476–H1498. DOI: 10.1152/ajpheart.00859.2014

8. Горбань А.Н., Манчук В.Т., Петушкова Е.В. Динамика корреляции между физиологическими параметрами при адаптации и эколого-эволюционный принцип полифакторности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1987. Т. 10. С. 187–198.
9. Седов К.Р., Горбань А.Н., Петушкова Е.В., Манчук В.Т., Шаламова Е.Н. Корреляционная адаптометрия как метод диспансеризации населения // Вестник Академии медицинских наук СССР. 1988. № 10. С. 69–75.
10. Леонова А.Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 200 с.
11. Аракелов Г.Г., Шотт Е.К. КГР как проявление эмоциональных, ориентировочных и двигательных составляющих стресса // Психологический журнал. 1998. Т. 19, № 4. С. 70–79.
12. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М.: Книга по Требованию, 2014. 295 с.
13. Панченко Л.Л. Диагностика стресса: учеб.-метод. пособие. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского. 2005.
14. Кистенёва Р.А., Кистенёв Ю.В., Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Бразовская Н.Г., Фокин В.А. Коррекция психоэмоционального напряжения у детей младшего школьного возраста с особыми образовательными потребностями с использованием адаптивного биоуправления // Бюллетень сибирской медицины. 2010. Т. 9, № 2. С. 113–118.
15. Смеляшова Л.Н., Захаров Е.В. Содержание катехоламинов и ренина в слюне у лиц с различным исходным вегетативным тонусом // Вестник Курганского государственного университета. 2015. № 2(36). С. 13–16.
16. Сотникова Е.Д. Изменения в системе крови при стрессе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2009. № 1. С. 50–55.
17. Горелов А.А., Румба О.Г., Гризорович Л.А., Весёлкина Т.Е. Психомоторные методы психодиагностики в научных исследованиях в сфере физической культуры и спорта // Новое в психолого-педагогических исследованиях. 2021. № 2. С. 26–37.
18. Спилбергер Ч.Д. Концептуальные и методологические проблемы исследования тревоги // Тревога и тревожность: хрестоматия / сост. и общ. ред. В.М. Астапова. 1983. С. 85–99.
19. Абабков В.А., Барышникова К., Воронцова-Венгер О.В., Горбунов И.А. Валидизация русскоязычной версии опросника «Шкала воспринимаемого стресса-10» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Психология. 2016. № 2. С. 6–15.
20. Fadel A., Hongzi M., Zachary K., Dina K., Miller Robert C. Smart homes that monitor breathing and heart rate // Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems. 2015. P. 837–846. DOI: 10.1145/2702123.2702200
21. Горбатов К. Silicon Radar: О дистанционном измерении дыхания и пульса // СВЧ-электроника. 2017. № 3.
22. Lindemann J., Leicker R., Rettinger G., Keck T. Nasal mucosal temperature during respiration // Clinical Otolaryngology & Allied Sciences. 2002. V. 27(3). P. 135–139. DOI: 10.1046/j.1365-2273.2002.00544.x
23. Fei J., Zhu Z., Pavlidis I. Imaging respiratory rate in the CO₂ absorption band // Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Shanghai, China). 2005. P. 700–790. DOI: 10.1109/IEMBS.2005.1616510
24. Берловская Е.Е., Черкасова О.П., Ожередов И.А., Адамович Т.В., Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Шкуринов А.П. Новый подход к терагерцевой диагностике психоэмоционального состояния человека // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 1. С. 70–77.
25. Берловская Е.Е., Черкасова О.П., Ожередов И.А., Адамович Т.В., Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Шкуринов А.П. Бесконтактная регистрация функции дыхания на основе анализа ИК-ТГц-изображений лица человека // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 6. С. 959–967. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-737
26. Herborn K.A., Graves J.L., Jerem P., Evans N.P., Nager R., McCafferty D.J., McKeegan D. Skin temperature reveals the intensity of acute stress // Physiol Behav. 2015. V. 152. P. 225–230.
27. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A., Syrkina A.G. Analysis of exhaled air of patients with myocardial infarction by laser spectroscopy and data mining // Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI. SPIE, 2018. V. 10685. P. 142–148. DOI: 10.1117/12.2307058
28. Bukreeva E.B., Bulanova A.A., Kistenev Y.V., Nikiforova O.Y. Photoacoustic spectroscopy evaluation of the impact of smoking on the composition of exhaled air in patients with bronchopulmonary diseases // Terapevticheskiy arkhiv. 2017. V. 89(3) P. 34–37. DOI: 10.17116/terarkh201789334-37
29. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A., Penkova O.V., Kostyukova N., Karapuzikov A.A. Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy // Journal of Biomedical Optics. 2017. V. 22(1). DOI: 10.1117/1.JBO.22.1.017002
30. de Lacy Costello B., Amann A., Al-Kateb H., Flynn C., Filipiak W., Khalid T., Ratcliffe N.M. A review of the volatiles from the healthy human body // Journal of breath research. 2014. V. 8(1). DOI: 10.1088/1752-7155/8/1/014001
31. Williams J., Stöner C., Wicker J., Krauter N., Derstroff B., Bourtsoukidis E., Kramer S. Cinema audiences reproducibly vary the chemical composition of air during films, by broadcasting scene specific emissions on breath // Scientific reports. 2016. V. 6(1). P. 1–10. DOI: 10.1038/srep25464
32. Turner M.A., Bandelow S., Edwards L., Patel P., Martin H.J., Wilson I.D., Thomas C.L.P. The effect of a paced auditory serial addition test (PASAT) intervention on the profile of volatile organic compounds in human breath: a pilot study // Journal of Breath Research. 2013. V. 7(1). DOI: 10.1088/1752-7155/7/1/017102
33. Martin H.J., Turner M.A., Bandelow S., Edwards L., Riazanskaia S., Thomas C.L.P. Volatile organic compound markers of psychological stress in skin: a pilot study // Journal of Breath Research. 2016. V. 10(4). DOI: 10.1088/1752-7155/10/4/046012
34. Tonacci A., Sansone F., Pala A.P., Conte R. Exhaled breath analysis in evaluation of psychological stress: A short literature review // International Journal of Psychology. 2019. V. 54(5). P. 589–597. DOI: 10.1002/ijop.12494
35. NEC. 2014. URL: <https://www.nec.com/en/press/201411/images/1101-01-01.pdf>
36. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V. Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system // Physical review letters. 2015. V. 114(10). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.106805
37. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
38. Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Ластовкин А.А., Приползин С.И., Собакинская Е.А., Черняева М.Б., Анфертьев В.А. Приемники излучения терагерцевого частотного диапазона // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 6-1. С. 81–87.

39. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. Т. 122.
40. Obersteiner F., Bönisch H., Engel A. An automated gas chromatography time-of-flight mass spectrometry instrument for the quantitative analysis of halocarbons in air // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V. 9 (1). P. 179–194.
41. GAS Dortmund. URL: <https://www.gas-dortmund.de/>
42. Amann A., Schwarz K., Wimmer G., Witkovsky V. Model based determination of detection limits for proton transfer reaction mass spectrometer // *Measurement Science Review*. 2010. V. 10(6). P. 180–188.
43. PTRS Group. URL: <http://www.pters.com/>
44. Fernandes M.P., Venkatesh S., Sudarshan B.G. Early detection of lung cancer using nano-nose-a review // *The open biomedical engineering journal*. 2015. V. 9. P. 228. DOI: 10.2174/1874120701509010228
45. Wilson A.D., Baietto M. Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications // *Sensors*. 2011. V. 11(1). P. 1105–1176. DOI: 10.3390/s110101105
46. Bruins M., Rahim Z., Bos A., van de Sande W.W., Endtz H. P., van Belkum A. Diagnosis of active tuberculosis by e-nose analysis of exhaled air // *Tuberculosis*. 2013. V. 93(2). P. 232–238. DOI: 10.1016/j.tube.2012.10.002
47. Schnabel R.M., Boumans M.L.L., Smolinska A., Stobberingh E.E., Kaufmann R., Roekaerts P.M.H.J., Bergmans D.C.J.J. Electronic nose analysis of exhaled breath to diagnose ventilator-associated pneumonia // *Respiratory medicine*. 2015. V. 109(11). P. 1454–1459. DOI: 10.1016/j.rmed.2015.09.014
48. Montuschi P., Mores N., Trové A., Mondino C., Barnes P.J. The electronic nose in respiratory medicine // *Respiration*. 2013. V. 85(1). P. 72–84. DOI: 10.1159/000340044
49. Степанов Е.В. Методы высокочувствительного газового анализа молекул-биомаркеров в исследованиях выдыхаемого воздуха // Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова. 2005. Т. 61. С. 5–47.
50. Chow K.K., Short M., Zeng H. A comparison of spectroscopic techniques for human breath analysis // *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 2012. V. 1(4). P. 339–353. DOI: 10.3233/BSI-120029
51. De Gouw J. A., Te Lintel Hekkert S., Mellqvist J., Warneke C., Atlas E.L., Fehsenfeld F.C., Zhu X. Airborne measurements of ethene from industrial sources using laser photo-acoustic spectroscopy // *Environmental science & technology*. 2009. V. 43(7). P. 2437–2442. DOI: 10.1021/es802701a
52. Li J., Chen W., Yu B. Recent progress on infrared photoacoustic spectroscopy techniques // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2011. V. 46(6). P. 440–471. DOI: 10.1080/05704928.2011.570835
53. Bozóki Z., Pogány A., Szabó G. Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2011. V. 46(1). P. 1–37. DOI: 10.1080/05704928.2010.520178
54. Kolker D.B., Pustovalova R.V., Starikova M.K., Karapuzikov A.I., Karapuzikov A.A., Kuznetsov O.M., Kistenev Y.V. Optical parametric oscillator within 2.4–4.3 μm pumped with a nanosecond Nd: YAG Laser // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012. V. 25(1). P. 77–81. DOI: 10.1134/S1024856012010071
55. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Shumskii V.K., Yakovlev S.V. Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range // *Optical Memory and Neural Networks*. 2016. V. 25(2). P. 88–94. DOI: 10.1117/12.2228564
56. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B., Karapuzikov A.I., Kistenev Y.V., Kuzmin D.A., Lokonov V.N. LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients // *Physics of wave phenomena*. 2014. V. 22(3). P. 189–196. DOI: 10.3103/S1541308X14030054
57. Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Zenov K.G., Starikova M.K., Kolker D.B., Karapuzikov A.A., Kuzmin D.A. Twin HgGa2S4 optical parametric oscillator at 4.3–10.78 μm for biomedical applications // *Saratov Fall Meeting 2014: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVI; Laser Physics and Photonics XVI; and Computational Biophysics*. SPIE, 2015. V. 9448. P. 30–35. DOI: 10.1117/12.2181802
58. Карапузи́ков А.А., Кузнецов О.М., Кистенев Ю.В. Наносекундный параметрический генератор света в среднем ИК-диапазоне с двухпроходной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 124–128.
59. Романовский О.А., Садовников С., Харченко О.В., Яковлев С.В. Возможности применения параметрического генератора света в задачах лазерного зондирования атмосферы в ИК-диапазоне // Актуальные проблемы радиофизики : VII Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 18–22 сентября 2017 г. STT Publishing, 2017. С. 162.
60. Бочковский Д.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: результаты моделирования и экспериментов // Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. Физика. 2014. Т. 325, № 2. С. 127–136.
61. Weitkamp C. (ed.). Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. Springer Science & Business, 2006. V. 102.
62. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Котков А.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В., Климачев Ю.М. Дистанционное зондирование закиси азота и метана с использованием линий излучения обертонового СО-лазера // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 2. С. 313–316.
63. Platt U., Stutz J. Differential absorption spectroscopy // *Differential optical absorption spectroscopy*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. P. 135–174. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4
64. Гейко П.П., Петров Д.В., Смирнов С.С. Реализация метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии для измерения вулканических газовых выбросов // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 103–109.

References

1. Nitsch, J.R. (1981) Zur Gegenstandsbestimmung der Stressforschung. *Stress: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen*. pp. 29–51.
2. Russell, E., Koren, G., Rieder, M. & Uum, S. (2012) Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered questions. *Psychoneuroendocrinology*. 37(5). pp. 589–601. DOI: 10.1016/j.psycheneu.2011.09.009
3. Stewart, W.F., Ricci, J.A., Chee, E., Hahn, S.R. & Morganstein, D. (2003) Cost of lost productive work time among US workers with depression. *Jama*. 289(23). pp. 3135–3144. DOI: 10.1001/jama.289.23.3135

4. Pardon, M.C. & Marsden, C.A. (2008) The long-term impact of stress on brain function: from adaptation to mental diseases. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. 32. pp. 1071–1072. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.05.013
5. Bergmann, N., Gyntelberg, F. & Faber, J. (2014) The appraisal of chronic stress and the development of the metabolic syndrome: a systematic review of prospective cohort studies. *Endocrine connections*. 3(2) pp. R55–R80. DOI: 10.1530/EC-14-0031
6. Machado, A., Herrera, A.J., de Pablos, R.M., Espinosa-Oliva, A.M., Sarmiento, M., Ayala, A. & Cano, J. (2014) Chronic stress as a risk factor for Alzheimer's disease. *Reviews in the Neurosciences*. 25(6). pp. 785–804. DOI: 10.1515/revneuro-2014-0035
7. Golbidi, S., Frisbee, J.C. & Laher, I. (2015) Chronic stress impacts the cardiovascular system: animal models and clinical outcomes. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 308(12). pp. H1476–H1498. DOI: 10.1152/ajpheart.00859.2014
8. Gorban, A.N., Manchuk, V.T. & Petushkova, E.V. (1987) Dinamika korrelyatsii mezhdu fiziologicheskimi parametrami pri adaptatsii i ekologo-evolucionnyy princip polyfactornosti [Dynamics of correlation between physiological parameters during adaptation and ecological-evolutionary principle of polyfactoricity]. *Problemy ekologicheskogo monitringa i modelirovaniya ecosystem - Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. 10. pp. 187–198.
9. Sedov, K.R., Gorban, A.N., Petushkova, E.V., Manchuk, V.T. & Shalamova, E.N. (1988) Korrelyatsionnaya adaptometriya kak metod dispanserizatsii naseleniya [Correlation adaptometry as a method of medical examination of the population]. *Vestnik akademii nauk SSSR - Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. (10). pp. 69–75.
10. Leonova, A.B. (1984) *Psichodiagnostika funktsional'nyh sostoyaniy cheloveka* [Psychodiagnostics of functional states of a person]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.
11. Arakelov, G.G. & Schott, E.K. (1998) KGR kak proyavlenie emotsional'nyh, orientirovochnykh i dvigatel'nykh sostavlyayushikh stressa [KGR as a manifestation of emotional, orientation and motor components of stress]. *Psichologicheskii zhurnal – Psychological Journal*. 19(4). pp. 70–79.
12. Baevsky, R.M. (2014) *Prognostirovanie sostoyaniy na grani normy i patologii* [Prediction of conditions on the verge of norm and pathology]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu.
13. Panchenko, L.L. (2005) *Diagnostika stressa: uchebno-metodicheskoe posobie* [Stress diagnostics: an educational and methodical manual]. Vladivostok: MGU im. Adm. G.I. Nevel'skogo.
14. Kisteneva, R.A., Kistenev, Yu.V., Pekker, Ya.S., Brazovsky, K.S., Brazovskaya, N.G. & Fokin, V.A. (2010). Correction of psycho-emotional stress in primary schoolchildren with special educational needs with the use of biofeedback. *Bulleten' sibirskoy mediciny – Bulletin of Siberian Medicine*. 9(2). pp. 113–118. (In Russian)
15. Smelysheva, L.N. & Zakharov, E.V. (2015) The content of catecholamines and rennin in saliva in persons with various initial autonomic tones. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Kurgan State University*. 2 (36). pp. 13–16. (In Russian).
16. Sotnikova, E.D. (2009) Changes in blood system at stress. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo – Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*. (1). pp. 50–55. (In Russian).
17. Gorelov, A.A., Rumba, O.G., Grigorovich, L.A., Veselkina, T.E. (2021) Psychomotor methods of psychodiagnostics in scientific research in the field of physical culture and sports. *Novoe v psikhologo-pedagogicheskikh issledovaniyakh – Innovation in Psychological and Pedagogical Studies*. 2(62). pp. 26–37. (In Russian).
18. Spielberger, C.D. (1983) Kontseptualnye i metodologicheskie problemy issledovaniya trevogi [Conceptual and methodological problems of anxiety research]. In: Astapova, V.M. (Ed.) *Trevoga i trevozhnost: khrestomatiya* [Anxiety and disturbance: a text-book]. pp. 85–99.
19. Ababkov, V.A., Baryshnikova, K., Vorontsova-Wenger, O.V. & Gorbunov, I.A. (2016) Validation of the Russian version of the questionnaire “Scale of perceived stress-10”. *Vestnik of Saint Petersburg University. Psychology*. (2). pp. 6–15. (In Russian).
20. Fadel, A., Hongzi, M., Zachary, K., Dina, K., Miller, R.C. (2015) Smart homes that monitor breathing and heart rate. In: *Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems*. pp. 837–846. DOI: 10.1145/2702123.2702200
21. Gorbato, K. (2017) Silicon Radar: O dstantsionnom izmerenii dykhaniya i pulsa [Silicon Radar: About remote measurement of respiration and pulse]. *SVCh-elektronika – Microwave electronics*. 3.
22. Lindemann, J., Leiacker, R., Rettinger, G., & Keck, T. (2002) Nasal mucosal temperature during respiration. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*. 27(3). pp. 135–139. DOI: 10.1046/j.1365-2273.2002.00544.x
23. Fei, J., Zhu, Z. & Pavlidis, I. (2005) Imaging respiratory rate in the CO2 absorption band. In: *Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (Shanghai, China)*. pp. 700–790. DOI: 10.1109/IEMBS.2005.1616510
24. Berlovskaya, E.E., Cherkasova, O.P., Ozheredov, I.A., Adamovich, T.V., Isaichev, E.S., Isaichev, S.A. & Shkurinov A.P. (2019) Novyi podkhod k teragertsevoi diagnostike psikhoemotsionalnogo sostoyaniya cheloveka [A new approach to terahertz diagnostics of a person's psychoemotional state]. *Kvantovaya elektronika – Quantum electronics*. 49(1). pp. 70–77.
25. Berlovskaya, E.E., Cherkasova, O.P., Ozheredov, I.A., Adamovich, T.V., Isaichev, E.S., Isaichev, S.A. & Shkurinov, A.P. (2020) Beskontaktnaya registratsiya funktsii dykhaniya na osnove analiza IK-TGts-izobrazhenii litsa cheloveka [Contactless registration of respiratory function based on the analysis of IR-THz images of a person's face]. *Kompyuternaya optika – Computer Optics Journal*. 44(6). pp. 959–967. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-737.
26. Herborn, K.A., Graves, J.L., Jerem, P., Evans, N.P., Nager, R., McCafferty, D.J. & McKeegan, D. (2015) Skin temperature reveals the intensity of acute stress. *Physiology & Behavior*. 152. pp. 225–230.
27. Kistenev, Y.V., Borisov, A.V., Kuzmin, D.A. & Syrkina, A.G. (2018) Analysis of exhaled air of patients with myocardial infarction by laser spectroscopy and data mining. *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI*. 10685. pp. 142–148. DOI: 10.1117/12.2307058
28. Bukreeva, E.B., Bulanova, A.A., Kistenev, Y.V. & Nikiforova, O.Y. (2017) Photoacoustic spectroscopy evaluation of the impact of smoking on the composition of exhaled air in patients with bronchopulmonary diseases. *Terapevticheskii arkhiv – Therapeutic Archive*. 89(3). pp. 34–37. DOI: 10.17116/terarkh201789334-37. (In Russian).
29. Kistenev, Y.V., Borisov, A.V., Kuzmin, D.A., Penkova, O.V., Kostyukova, N. & Karapuzikov, A.A. (2017) Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 22(1). DOI: 10.1117/1.JBO.22.1.017002

30. de Lacy Costello, B., Amann, A., Al-Kateb, H., Flynn, C., Filipiak, W., Khalid, T. & Ratcliffe, N.M. (2014) A review of the volatiles from the healthy human body. *Journal of Breath Research*. 8(1). DOI: 10.1088/1752-7155/8/1/014001
31. Williams, J., Stönmner, C., Wicker, J., Krauter, N., Derstroff, B., Boutsoukidis, E. & Kramer, S. (2016) Cinema audiences reproducibly vary the chemical composition of air during films, by broadcasting scene specific emissions on breath. *Scientific Reports*. 6(1). pp. 1–10. DOI: 10.1038/srep25464
32. Turner, M.A., Bandelow, S., Edwards, L., Patel, P., Martin, H.J., Wilson, I.D. & Thomas, C.L.P. (2013) The effect of a paced auditory serial addition test (PASAT) intervention on the profile of volatile organic compounds in human breath: a pilot study. *Journal of Breath Research*. 7(1). DOI: 10.1088/1752-7155/7/1/017102
33. Martin, H.J., Turner, M.A., Bandelow, S., Edwards, L., Riazanskaia, S. & Thomas, C.L.P. (2016) Volatile organic compound markers of psychological stress in skin: a pilot study. *Journal of Breath Research*. 10(4). DOI: 10.1088/1752-7155/10/4/046012
34. Tonacci, A., Sansone, F., Pala, A.P. & Conte, R. (2019) Exhaled breath analysis in evaluation of psychological stress: A short literature review. *International Journal of Psychology*. 54(5). pp. 589–597. DOI: 10.1002/ijop.12494
35. NEC (2014). Available from: <https://www.nec.com/en/press/201411/images/1101-01-01.pdf>
36. Muravev, V.M., Gusikhin, P.A., Andreev, I.V. & Kukushkin, I.V. (2015) Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system. *Physical review letters*. 114(10). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.106805
37. Alferov, Zh.I. (1998) Istoriya i budushchee poluprovodnikovykh geterostruktur [History and future of semiconductor heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and technology of semiconductors*. 32(1). pp. 3–18.
38. Vaks, V.L., Domracheva, E.G., Lastovkin, A.A., Pripolzin, S.I., Sobakinskaya, E.A., Chernyaeva, M.B. & Anfertiev, V.A. (2013) Receivers of THz frequency range. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 6-1. pp. 81–87. (In Russian).
39. Korotaev, V.V., Melnikov, G.S., Mikheev, S.V., Samkov, V.M. & Soldatov, Yu.I. (2012) *Osnovy teplovideniya* [Fundamentals of thermal imaging]. SPb: NIU ITMO. 122.
40. Obersteiner, F., Bönisch, H. & Engel, A. (2016) An automated gas chromatography time-of-flight mass spectrometry instrument for the quantitative analysis of halocarbons in air. *Atmospheric Measurement Techniques*. 9(1). pp. 179–194.
41. GAS Dortmund. Available from: <https://www.gas-dortmund.de/>
42. Amann, A., Schwarz, K., Wimmer, G. & Witkovsky, V. (2010) Model based determination of detection limits for proton transfer reaction mass spectrometer. *Measurement Science Review*. 10(6). pp. 180–188.
43. PTRS Group. Available from: <http://www.pters.com/>
44. Fernandes, M.P., Venkatesh, S. & Sudarshan, B.G. (2015) Early detection of lung cancer using nano-nose-a review. *The Open Bio-medical Engineering Journal*. 9. pp. 228. DOI: 10.2174/1874120701509010228
45. Wilson, A.D. & Baietto, M. (2011) Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications. *Sensors*. 11(1). pp. 1105–1176. DOI: 10.3390/s110101105
46. Bruins, M., Rahim, Z., Bos, A., van de Sande, W.W., Endtz, H.P. & van Belkum, A. (2013) Diagnosis of active tuberculosis by e-nose analysis of exhaled air. *Tuberculosis*. 93(2). pp. 232–238. DOI: 10.1016/j.tube.2012.10.002
47. Schnabel, R.M., Boumans, M.L.L., Smolinska, A., Stobberingh, E.E., Kaufmann, R., Roekaerts, P.M.H.J. & Bergmans, D.C.J.J. (2015) Electronic nose analysis of exhaled breath to diagnose ventilator-associated pneumonia. *Respiratory Medicine*. 109(11). pp. 1454–1459. DOI: 10.1016/j.rmed.2015.09.014
48. Montuschi, P., Mores, N., Trovè, A., Mondino, C. & Barnes, P.J. (2013) The electronic nose in respiratory medicine. *Respiration*. 85(1). pp. 72–84. DOI: 10.1159/000340044
49. Stepanov, E.V. (2005) Metody vysokochuvstvitelnogo gazovogo analiza molekul-biomarkerov v issledovaniyakh vydykhaemogo vozdukh [Methods of highly sensitive gas analysis of biomarker molecules in exhaled air studies]. *Trudy instituta obshchei fiziki im. A.M. Prokhorova – Proceedings of the A.M. Prokhorov Institute of General Physics*. 61. pp. 5–47.
50. Chow, K.K., Short, M. & Zeng, H. (2012) A comparison of spectroscopic techniques for human breath analysis. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 1(4). pp. 339–353. DOI: 10.3233/BSI-120029
51. De Gouw, J.A., Te Lintel Hekkert, S., Mellqvist, J., Warneke, C., Atlas, E.L., Fehsenfeld, F.C. & Zhu, X. (2009) Airborne measurements of ethene from industrial sources using laser photo-acoustic spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 43(7). pp. 2437–2442. DOI: 10.1021/es802701a
52. Li, J., Chen, W. & Yu, B. (2011) Recent progress on infrared photoacoustic spectroscopy techniques. *Applied Spectroscopy Reviews*. 46(6). pp. 440–471. DOI: 10.1080/05704928.2011.570835
53. Bozóki, Z., Pogány, A. & Szabó, G. (2011) Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges. *Applied Spectroscopy Reviews*. 46(1). pp. 1–37. DOI: 10.1080/05704928.2010.520178
54. Kolker, D.B., Pustovalova, R.V., Starikova, M.K., Karapuzikov, A.I., Karapuzikov, A.A., Kuznetsov, O.M. & Kistenev, Y.V. (2012) Optical parametric oscillator within 2.4–4.3 μm pumped with a nanosecond Nd: YAG Laser. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 25(1). pp. 77–81. DOI: 10.1134/S1024856012010071
55. Romanovskii, O.A., Sadovnikov, S.A., Kharchenko, O.V., Shumskii, V.K. & Yakovlev, S.V. (2016) Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range. *Optical Memory and Neural Networks*. 25(2). pp. 88–94. DOI: 10.1117/12.2228564
56. Karapuzikov, A.A., Sherstov, I.V., Kolker, D.B., Karapuzikov, A.I., Kistenev, Y.V., Kuzmin, D.A. & Lokonov, V.N. (2014) LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients. *Physics of Wave Phenomena*. 22(3). pp. 189–196. DOI: 10.3103/S1541308X14030054
57. Kostyukova, N.Y., Boyko, A.A., Zenov, K.G., Starikova, M.K., Kolker, D.B., Karapuzikov, A.A. & Kuzmin, D.A. (2015) Twin HgGa2S4 optical parametric oscillator at 4.3–10.78 μm for biomedical applications. In: *Saratov Fall Meeting 2014: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVI; Laser Physics and Photonics XVI; and Computational Biophysics*. 9448. pp. 30–35. DOI: 10.1117/12.2181802
58. Karapuzikov, A.A., Kuznetsov, O.M. & Kistenev, Yu.V. (2012) Nanosekundnyi parametricheskii generator sveta v srednem IK diapazone s dvukhprokhodnoi nakachkoi [Nanosecond parametric light generator in the mid-IR range with two-pass pumping]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*. 2. pp. 124–128.

59. Romanovskii, O.A., Sadovnikov, S., Kharchenko, O.V. & Yakovlev, S.V. (2017) Vozmozhnosti primeneniya parametricheskogo generatora sveta v zadachakh lazernogo zondirovaniya atmosfery v IR-diapazone [The possibilities of using a parametric light generator in the tasks of laser sensing of the atmosphere in the IR range]. In: *Aktualnye problemy radiofiziki: VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (Tomsk, 18–22 sentyabrya 2017)* [Actual problems of radiophysics : VII International Scientific and Practical Conference, Tomsk, September 18–22, 2017]. STT Publishing.
60. Bochkovskii, D.A., Romanovskii, O.A., Kharchenko, O.V. & Yakovlev, S.V. (2014) Lidarnoe zondirovanie mal'kh gazovykh sostavlyayushchikh atmosfery metodom differentsialnogo pogloshcheniya: rezultaty modelirovaniya i eksperimentov [Lidar sounding of small gas components of the atmosphere by differential absorption method: results of modeling and experiments]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Matematika i mekhanika. Fizika - Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Mathematics and Mechanics. Physics*. 325(2). pp. 127–136.
61. Weitkamp, C. (Ed.). (2006) *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer Science & Business. 102.
62. Ionin, A.A., Kozlov, A.Yu., Kotkov, A.A., Romanovskii, O.A., Kharchenko, O.V., Yakovlev, S.V., & Klimachev, Yu.M. (2014) Remote sensing of nitrous oxide and methane using radiation lines of a CO overtone laser. *Journal of Applied Spectroscopy*. 81(2). pp. 309–312.
63. Platt, U. & Stutz, J. (2008) Differential absorption spectroscopy. In: *Differential optical absorption spectroscopy*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 135–174. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4
64. Geiko, P.P., Petrov, D.V. & Smirnov, S.S. (2018) Realizatsiya metoda differentsialnoi opticheskoi absorbtionnoi spektroskopii dlya izmereniya vulkanicheskikh gazovykh vybrosov [Implementation of the differential optical absorption spectroscopy method for measuring volcanic gas emissions]. *Nauchnoe priborostroenie - Scientific instrumentation*. 28(4). pp. 103–109.

Информация об авторах:

Кистенев Юрий Владимирович – доктор физико-математических наук, заместитель проректора по научной и инновационной деятельности, заведующий лабораторией лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yuk@iao.ru; ORCID: 0000-0001-5760-1462.

Тримасов Игорь – студент 1-го курса магистратуры, лаборант лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения Национального исследовательского Томского государственного университета, (Томск, Россия). ORCID: 0000-0002-6156-2395.

Шкуринов Александр Павлович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей физики и волновых процессов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID: 0000-0002-6309-4732.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kistenev Yuri V., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Deputy Vice-Rector for Research and Innovation, head of laboratory, professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yuk@iao.ru. ORCID ID: 0000-0001-5760-1462.

Trimassov I., 1st year master's student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID: 0000-0002-6156-2395.

Shkurinov Alexander P., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation). E-mail: ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID ID: 0000-0002-6309-4732.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023