Изучение особенностей терагерцевого излучения кожи человека при воздействии ментальной нагрузки

© *К.А. Бакшеева*[1,2], *Ю.В. Журин*[1], *Р.В. Ожегов*[1,2], *Н.В. Кинев*[3], *В.П. Кошелец*[3], *Г.Н. Гольцман*[1,2]

[1] Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия
[3] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия
E-mail: baksheeva.kseniya@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 11 июня 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Представлены исследования особенностей терагерцевого (THz) излучения кожи человека при воздействии ментальной нагрузки. Исследования проведены при помощи однопиксельной THz-камеры на основе сверхпроводникового интегрального приемника. Полученные радиояркостные изображения показали наличие выбросов в области переносицы и надбровных дуг, что может служить индикатором психологического состояния человека.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон частот, сканатор, человеческая кожа, ментальный стресс, сверхпроводниковый интегральный приемник.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.23.64003.9530k

Работа потовых желез, расположенных по всей поверхности тела человека, регулируется симпатической нервной системой. Реагируя на физическую и ментальную нагрузку, а также на стресс и эмоциональное состояние человека, симпатическая нервная система влияет на повышение артериального давления, увеличение сердечного ритма и усиление потоотделения. В работе [1] при помощи оптической когерентной томографии было продемонстрировано, что верхняя часть протоков потовых желез имеет спиральную структуру. Основываясь на геометрических размерах структур и проводимости пота, в 2008 г. авторы работы [2] выдвинули предположение, что потовые протоки могут работать как низкодобротные терагерцевые (THz) спиральные антенны, модулирующими факторами для которых служат ментальная активность и стресс. Изменение уровня стресса ведет к излучению такой антенны. Данная теория развивается израильской группой ученых под руководством Фельдмана [3,4]. В воей работе они сосредоточились на исследовании излучения от одной точки, однако для практического использования получаемой информации от „потовых“ антенн необходимо перейти к построению THz-изображений.

Целью настоящей работы является исследование взаимосвязи характеристик THz-излучения лица человека с его психологическим состоянием, а также оценка возможности использования радиояркостных изображений для неинвазивной диагностики уровня стресса.

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка с использованием однопиксельной THz-камеры. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Приемным устройством камеры служит сверхпроводниковый интегральный приемник (superconducting integrated receiver, SIR) [5]. SIR является уникальным гетеродинным приемником, объединяющим на одной микросхеме размером $4 \times 4 \times 0.5$ mm высокочувствительный СИС-смеситель Nb/AlN/NbN (СИС — сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник), генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода и гармонический смеситель, выполненный по той же технологии, что и основной смеситель, и предназначенный для организации фазовой автоподстройки частоты генератора. Микросхема SIR работает при температуре около 4.2 K и располагается в вакуумном заливном криостате с жидким гелием; шумовая температура SIR составляет около 150 K на частоте 500 GHz.

Полученный SIR-сигнал преобразуется в полосу промежуточных частот (IF) 4–8 GHz, усиливается системой усилителей и подается на систему сбора и управления данными. Для стабилизации гетеродина используется петля обратной связи с системой фазовой автоподстройки частоты (FFO), которая использует сигнал IF гармонического смесителя в диапазоне 0–1 GHz. В качестве опорного сигнала для гармонического смесителя используется сигнал внешнего синтезатора 20 GHz, а для FFO — 400 MHz.

Входной оптический тракт THz-камеры представляет собой сканатор на основе внеосевых параболических зеркал. Одно зеркало закреплено неподвижно напротив окна криостата. Другое зеркало крепится к держателю, позволяющему перемещать точку фокусировки по вертикали и горизонтали. Отклонение держателя с зеркалом осуществляется при помощи управляемых шаговых актуаторов FL35ST-25.

На расстоянии 26 cm от центра подвижного зеркала располагается держатель для фиксации положения головы. Держатель позволяет разместить лицо испытуемого под небольшим углом к сканирующей системе, при этом человек смотрит на монитор, на котором демонстриру-

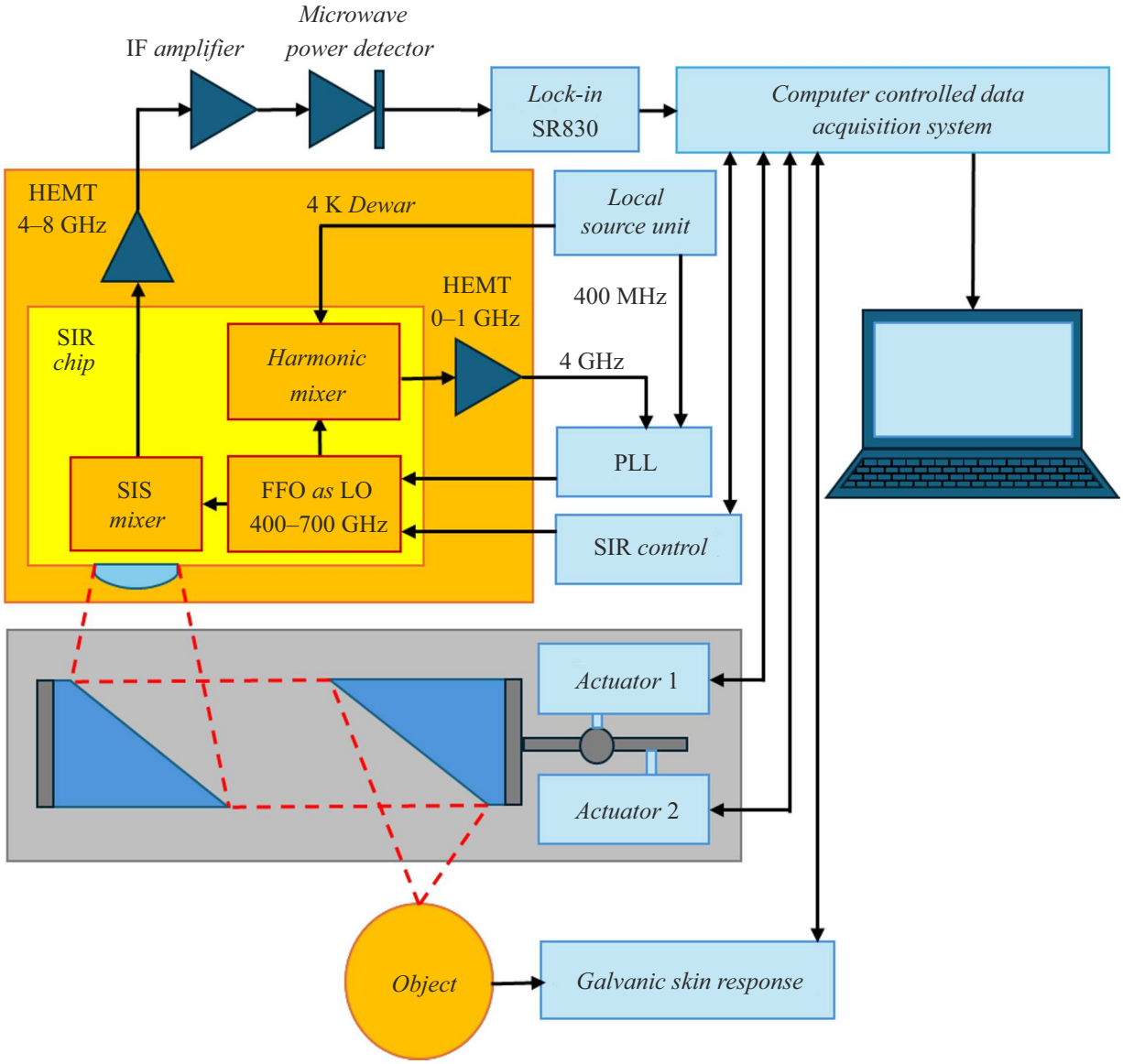


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки с использованием однопиксельной THz-камеры. FFO *as* LO — сверхпроводниковый генератор гетеродина как локальный осциллятор, HEMT — транзистор с высокой подвижностью электронов, SIS *mixer* — смеситель на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, IF *amplifier* — усилитель промежуточной частоты, PLL — система фазовой автоподстройки частоты SIR. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

ется программа испытаний. Во время эксперимента на испытуемого надевались наушники, а на экране монитора компьютера, расположенного рядом с оптической системой разработанного сканатора, демонстрировалась программа протокола испытаний.

Исследования проводились на частоте 500 GHz по протоколу, разработанному на основе проведенных ранее работ [6]. Экспериментальный протокол состоит из пяти частей, в которых этапы расслабления чередуются с этапами ментальной и физической нагрузок. Общая продолжительность протокола составляет 20 min. Во время этапов расслабления испытуемым демонстрировалось видео с приятным пейзажем и расслабляющей музыкой. Для создания ментальной нагрузки были использованы тест Струпа и тест на сравнение фигур. Тесты поминутно чередовались в течение 5 min. Физическая нагрузка достигалась путем периодического сжимания мячика на протяжении 2 min. Для подтверждения состояния человека использовался датчик кожно-гальванической реакции (galvanic skin response, GSR), который крепился к нерабочей руке добровольца.

Для уменьшения внешнего воздействия испытуемых просили выключить и отложить телефоны на время проведения эксперимента. Также испытуемые были проинформированы об экспериментальных аспектах, имеющих отношение к здоровью человека.

Были проведены исследования на группе здоровых добровольцев из 59 человек обоих полов в возрасте от

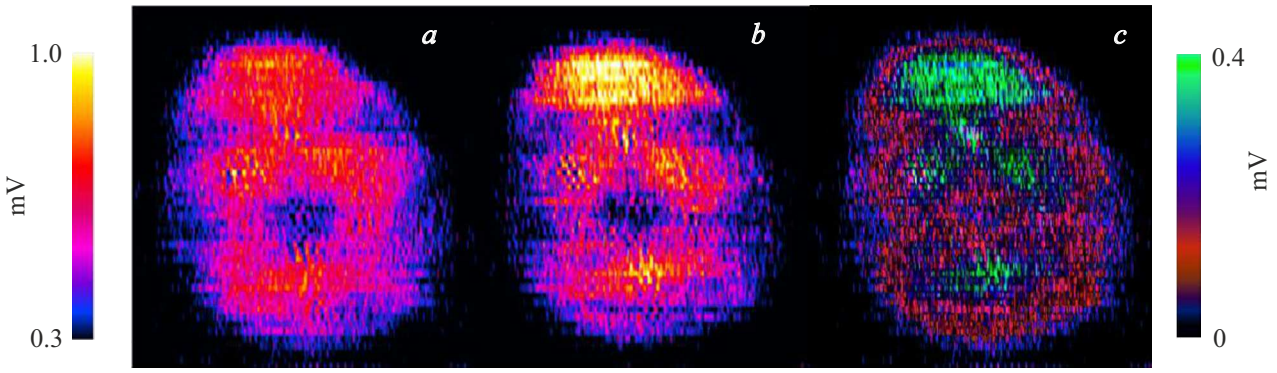


Рис. 2. Пример получаемых радиояркостных изображений испытуемого на частоте 500 GHz. *a* — радиояркостное изображение, полученное на этапе расслабления; *b* — радиояркостное изображение, полученное на этапе ментальной нагрузки; *c* — разница изображений в состоянии покоя и под действием ментальной нагрузки.

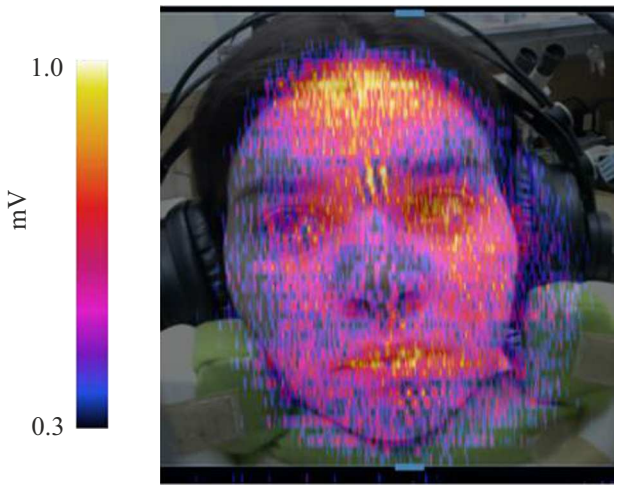


Рис. 3. Совмещение радиояркостного изображения с оптическим изображением лица добровольца.

18 до 35 лет. Средний возраст добровольцев составил 24 года.

В ходе выполнения работ сканировалось излучение лица добровольцев на частоте 500 GHz для дальнейшего построения радиояркостных изображений в состоянии расслабления, ментальной и физической нагрузок. Время получения одного изображения составляло 1 min. На рис. 2, *a* и *b* представлены примеры получаемых изображений для одного из добровольцев в состоянии покоя и при воздействии ментальной нагрузки соответственно. Слева расположена шкала условных цветов, соответствующая диапазону напряжений на выходе THz-камеры.

При выбранном расстоянии от лица до установки детализация получаемых изображений невысокая, однако на полученных изображениях явно можно различить более яркую область глаз и более темную область холодного носа добровольца. Для сравнения на рис. 3 представлен результат совмещения одного из радиояркостных изображений лица добровольца с его оптическим изображением, полученным при помощи веб-камеры, располагавшейся рядом с окном криостата с микросхемой SIR.

У большинства испытуемых наблюдаются выбросы в области переносицы и надбровных дуг на изображениях первого этапа расслабления, а также на изображениях этапов ментальной и физической нагрузок. Интересно, что у некоторых людей эти выбросы пропадают к концу эксперимента, а у некоторых такие выбросы возникают на этапах нагрузок, если их не было изначально. Для выполнения сравнительного анализа была взята разница изображений, полученных в состоянии покоя и при воздействии нагрузки. В качестве примера на рис. 2, *c* представлено изображение, получаемое при рассмотрении разницы изображений на рис. 2, *a* и *b*. Справа расположена шкала условных цветов, соответствующая диапазону разницы напряжений, полученному при сравнении изображений.

Визуальный сравнительный анализ радиояркостных изображений, получаемых в состоянии покоя и при воздействии нагрузки, показал небольшое изменение интенсивности излучения в области лба. Данное изменение может быть объяснено большой концентрацией потовых желез в этой области. Также хорошо различимо изменение выбросов в области переносицы и надбровных дуг. Это может свидетельствовать о том, что данные выбросы соответствуют возбужденному состоянию человека.

Таким образом, радиояркостные изображения человека могут отображать его психологическое состояние. Особенно интересно обнаружение выбросов в области переносицы и надбровных дуг, что требует проведения дополнительных исследований. Полученные результаты показывают перспективы использования данного метода для разработки неинвазивных средств мониторинга состояния человека, что может быть особенно важно в медицине и сфере безопасности.

Наиболее близкие исследования были выполнены группой ученых из МГУ под руководством Берловской [7], которые предлагали диагностировать психо-

эмоциональное состояние человека путем кластерного анализа THz-вклада в общий сигнал при одновременной регистрации ИК- и THz-излучений человека. Для получения изображений они использовали многоканальный детектор ИК–THz-диапазона частот IR/V-T0831C, который работает в широком спектральном диапазоне от 1 до 30 THz. В своей работе они продемонстрировали возможность классификации людей по типу реакции системы кровообращения в стрессовых условиях при помощи кластерного анализа ИК–THz-изображений, при этом отмечалась значимость зон в области лба, глаз со смещением к переносице и назальной области.

Следует отметить, что на приведенном в [7] ИК–THz-изображении отсутствует выброс в области переносицы, который мы наблюдаем на частоте 500 GHz. Это может свидетельствовать о том, что данный выброс является особенностью излучения лица в более узком спектральном диапазоне на более низких частотах.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 23-72-00046.

Соблюдение этических стандартов

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам институционального и/или национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Lademann, N. Otberg, H. Richter, L. Meyer, H. Audring, A. Teichmann, S. Thomas, A. Knüttel, W. Sterry, Skin Res. Technol., **13** (2), 119 (2007). DOI: 10.1111/j.1600-0846.2007.00208.x

[2] Yu. Feldman, A. Puzenko, P. Ben Ishai, A. Caduff, A.J. Agranat, Phys. Rev. Lett., **100** (12), 128102 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.128102

[3] N. Betzalel, P.B. Ishai, S. Einav, Yu. Feldman, J. Biophoton., **14** (7), e202100027 (2021). DOI: 10.1002/jbio.202100027

[4] N. Betzalel, P. Ben Ishai, A. Puzenko, Yu. Feldman, Sci. Rep., **12** (1), 4720 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-08432-5

[5] V.P. Koshelets, A. de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **5** (4), 687 (2015). DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2443500

[6] K. Baksheeva, R. Ozhegov, G. Goltsman, N. Kinev, V. Koshelets, A. Kochnev, N. Betzalel, A. Puzenko, P. Ben Ishai, Yu. Feldman, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **11** (4), 381 (2021). DOI: 10.1109/tthz.2021.3066099

[7] Е.Е. Берловская, О.П. Черкасова, И.А. Ожередов, Т.В. Адамович, Е.С. Исайчев, С.А. Исайчев, А.М. Макуренков, А.Н. Вараксин, С.Б. Гатилов, Н.И. Куренков, А.М. Черноризов, А.П. Шкуринов, Квантовая электроника, **49** (1), 70 (2019). [E.E. Berlovskaya, O.P. Cherkasova, I.A. Ozheredov, T.V. Adamovich, E.S. Isaychev, S.A. Isaychev, A.M. Makurenkov, A.N Varaksin, S.B. Gatilov, N.I. Kurenkov, A.M. Chirnorizov, A.P. Shkurinov, Quantum Electron., **49** (1), 70 (2019). DOI: 10.1070/QEL16906].