Пассивные исследования излучения человека при воздействии ментальной нагрузки на частоте 247 GHz

© *П.А. Малюкова*[1], *К.А. Бакшеева*[1,2], *К.И. Рудаков*[3,4], *Г.П. Назаров*[3,4], *Р.В. Ожегов*[1,2], *Г.Н. Гольцман*[1,2]

[1] Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия
[3] Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
[4] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия
E-mail: p.malukova@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 15 июня 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Представлены результаты исследования излучения кожи человека под действием ментальной нагрузки на частоте 247 GHz. Разработана экспериментальная установка на базе приемника на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник. Проведены исследования на 22 добровольцах в возрасте от 18 до 73 лет. Исследована корреляция детектора на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник и датчика кожно-гальванической реакции.

Ключевые слова: человеческая кожа, ментальная нагрузка, терагерцевый диапазон, малошумящий приемник на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.23.64005.9665k

Человек на протяжении всей жизни испытывает стресс. Ментальная нагрузка представляет совокупность реакций центральной нервной системы на внешние раздражители.

Вегетативный отдел нервной системы регулирует поведение человека во время стресса. При первых проявлениях стресса в организме начинается вырабатывание адреналина и норадреналина. Из-за гормонов в организме повышаются сердечный ритм, артериальное давление и потоотделение, вырабатываемое с помощью потовых желез.

В начале 2000-х годов проводилось изучение верхних слоев кожи. В ходе исследований были получены снимки потовых желез с помощью оптического томографа, на которых было видно, что потовый проток имеет спиральную форму [1]. Через год было выдвинуто предположение, что потовые железы работают как спиральные антенны. Данное предположение и его подтверждение описаны в исследованиях [2–5].

Существует несколько зон, имеющих большую концентрацию потовых желез. Такими зонами являются лоб, подмышечные впадины, ладони и др. Наиболее удобными для исследований в отличие от других областей являются ладони.

Для исследования излучения потовых желез на основе [5] была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Одним из ключевых элементов экспериментальной установки являлся детектор на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), работающий в диапазоне частот 211−275 GHz [6].

Сигнал, исходящий из ладони, попадал в окно криостата, после чего проходил через систему холодных зеркал и попадал на СИС-детектор с опорной частотой, равной 255 GHz. Пройдя высокочастотный малошумящий холодный усилитель, сигнал шел через электронно-перестраиваемый полосовой фильтр и попадал в систему сбора данных. Мощность гетеродинного сигнала регулировалась при помощи поляризатора и делителя пучка.

Ладонь испытуемого располагалась в специальном держателе во избежание непроизвольных движений руки, которые могли происходить во время эксперимента. На эту же руку крепился датчик кожно-гальванической реакции (galvanic skin response, GSR), с помощью которого измерялась электропроводность кожи.

На основе проведенных ранее исследований [5] был подготовлен протокол испытаний, представленный на рис. 2. Протокол состоял из пяти этапов общей продолжительностью 20 min: 5 min расслабления, 5 min умственной нагрузки, 5 min расслабления, 2 min физической нагрузки, 3 min расслабления.

Этапы расслабления сопровождались приятным видео с музыкой, помогающим испытуемым успокоиться. На этапе умственной нагрузки применялся тест Струпа и тест на кратковременную память, в котором необходимо было указать совпадают ли предшествующая и показанная в данный момент фигуры. Во время этапа физической нагрузки участникам необходимо было сжимать и разжимать мяч в течение 2 min.

Были проведены исследования на группе из 22 добровольцев, состоявшей из 10 женщин и 12 мужчин в возрасте от 18 до 73 лет. Средний возраст группы составил $\sim$ 34 года. Измерения проводились на частоте 247 GHz.

Во время проведения эксперимента снимались показания двух сигналов: сигнал с СИС-детектора измерялся в вольтах, GSR-датчик измерял электропроводность кожи в сименсах. Из-за различия в единицах измерения и

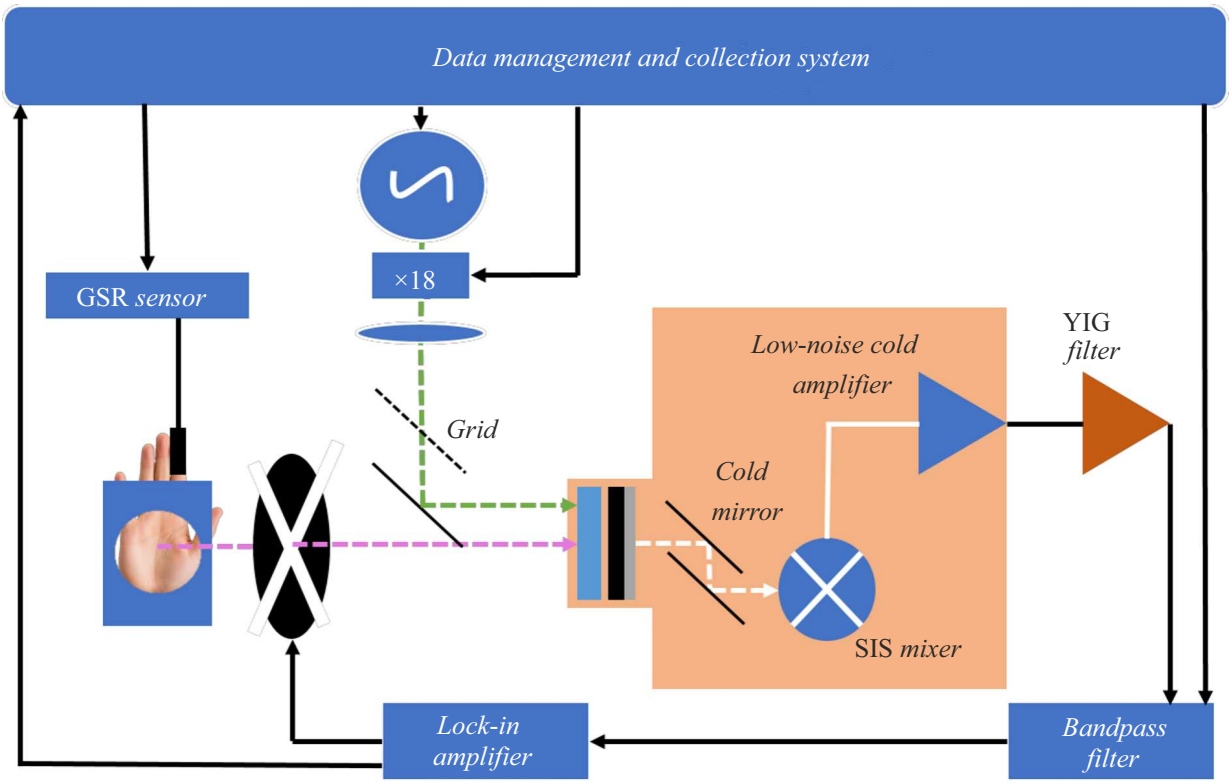


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. YIG *filter* — фильтр железо-иттриевого граната, GSR *sensor* — датчик кожно-гальванической реакции, SIS *mixer* — смеситель сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник.

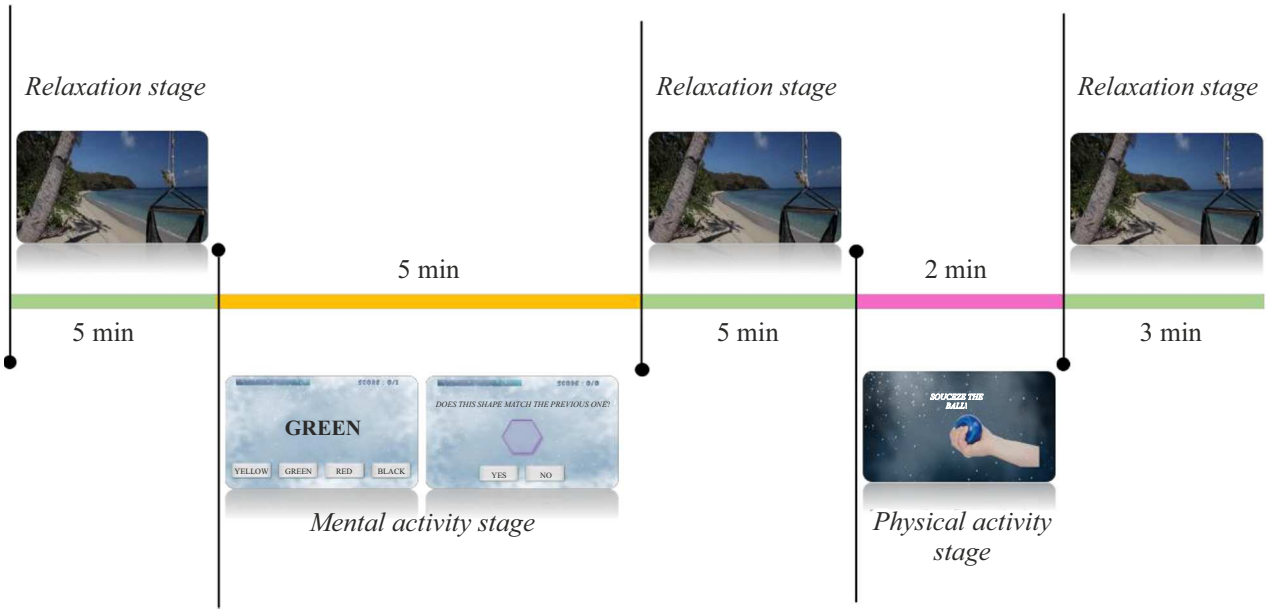


Рис. 2. Хронология протокола испытаний.

величинах сигналов СИС-детектора и GSR-датчика была проведена нормировка показаний по способу наибольшего и наименьшего значения. Пример получаемого графика представлен на рис. 3.

Датчик кожно-гальванической реакции обычно используется для определения психофизиологического состояния человека. Из рис. 3 видно, что для датчика наблюдаются четкие переходы, сопоставимые с этапами

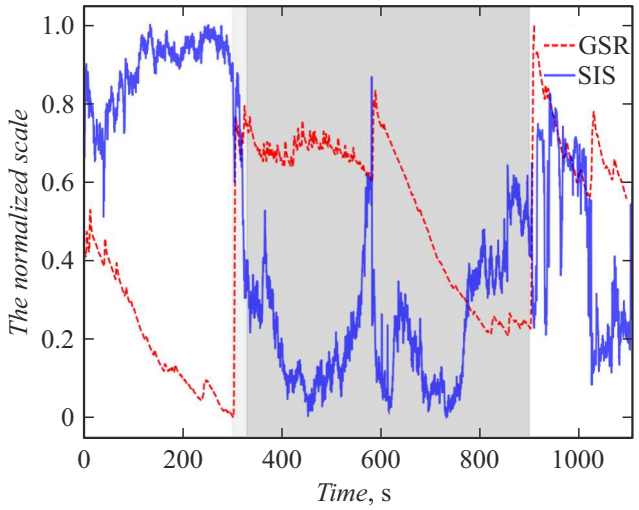


Рис. 3. Зависимость нормированных данных от времени.

протокола. Для определения согласованности сигналов GSR-датчика и СИС-детектора была рассчитана корреляция данных. Корреляция в случае зависимости, изображенной на рис. 3, равна -0.608.

Для определения возможности использования терагерцевого сигнала при определении ментального состояния человека было проведено корреляционное сравнение данных, полученных при помощи СИС-детектора и GSR-датчика, который обычно используется при определении состояния человека.

В связи с тем, что СИС-детектор и GSR-датчик имеют разное время реакции [7], была проведена дополнительная обработка данных. Для этого временна́я шкала была поделена на несколько участков: 0–300 s, 300–330 s, 330–900 s, 900–1080 s. Участок 300–330 s сжимался до 20 %, а участок 330–900 s подвергался растяжению на небольшой процент таким образом, чтобы точка 900 s оставалась неподвижной. На рис. 3 данные области обозначены светло-серым и серым цветом соответственно. Остальные части графика оставались без изменений.

В связи с неравномерной интенсивностью выделяемого пота сигналы, регистрируемые приемниками, являются релаксационными. Таким образом, возникла необходимость дополнительной обработки данных.

В программе, написанной на языке Python, был произведен подбор коэффициента сжатия или растяжения с шагом 0.01 по временно́й шкале для поиска лучшей корреляции.

В случае приведенного примера для дополнительной обработки данных применялись коэффициенты сжатия и растяжения, равные 0.8 и 1.001. Для оставшихся испытуемых значение коэффициентов отличалось. Этот факт может указывать на разную реакцию людей на стресс. Полученное в результате дополнительной обработки данных значение корреляции составило -0.63.

На рис. 4, *a* и *b* представлены результаты, полученные для испытуемых, участвующих в эксперименте, а также их корреляция до и после обработки.

Значения корреляций необработанных данных лежат в диапазоне от -0.6 до 0.4 (рис. 4, *a*). Среднее значение составляет -0.15, что означает слабую связь или полное отсутствие связи между сигналами СИС-детектора и GSR-датчика. После проведения дополнительной обработки данных у большинства заметен рост корреляций (рис. 4, *b*). Также следует заметить, что гистограмма корреляционных данных делится на область слабой и сильной корреляции. В участок сильной корреляции включаются значения, лежащие от -0.7 до -0.4, среднее значение в данном диапазоне равняется -0.51. Область слабой корреляции лежит от -0.3 до 0.4, среднее значение равняется 0.06. Диапазон корреляции данных после обработки расширился и составил от -0.7 до 0.4.

Таким образом, среднее значение корреляции изменилось и диапазон расширился, что указывает на эффективность данного метода обработки.

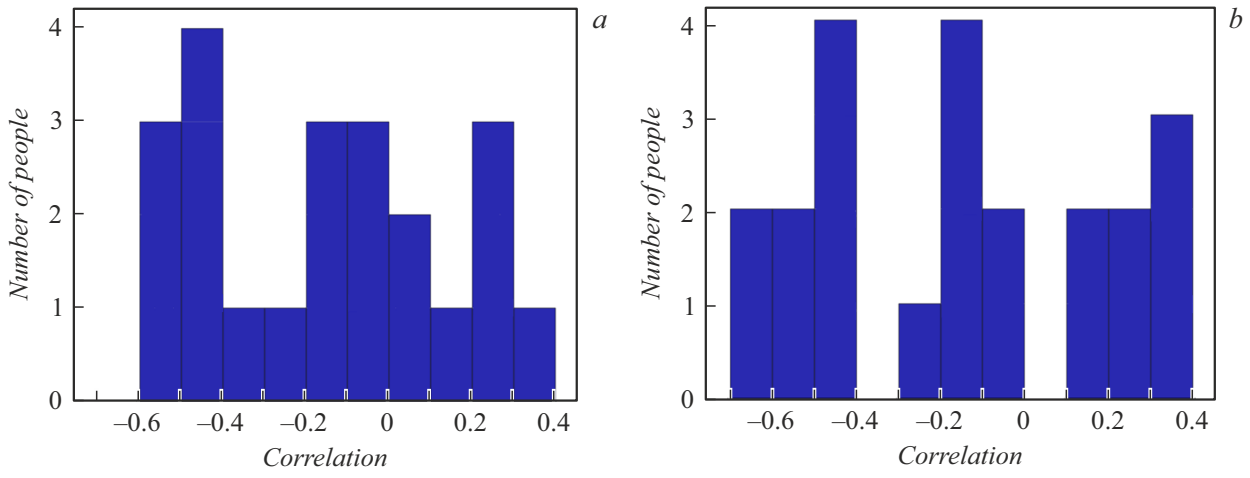


Рис. 4. Гистограммы данных до (*a*) и после (*b*) обработки методом локального изменения сигнала.

Полученные данные показали, что исходная корреляция между сигналами СИС-детектора и GSR-датчика лежала в диапазоне -0.6 до 0.4 и в среднем равнялась -0.15.

Применение обработки позволило немного улучшить показания корреляции. Получившиеся корреляции после обработки лежат в диапазоне от -0.7 до 0.4 и в среднем равняются -0.148. Широкий диапазон корреляций может быть связан с индивидуальной реакцией на стресс. Для подтверждения теории требуются дополнительные исследования и увеличение статистики.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке 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] A. Kochnev, N. Betzalel, P.B. Ishai, Yu. Feldman, Terahertz Sci. Technol., **11** (2), 43 (2018). DOI: 10.11906/TST.043-056.2018.06.05

[5] 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

[6] K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filippenko, M.E. Paramonov, R. Hesper, D.A.R. da Cost Lima, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, Appl. Sci., **11** (21), 10087 (2021). DOI: 10.3390/app112110087

[7] J. Bakker, M. Pechenizkiy, N. Sidorova, in *2011 11th IEEE Int. Conf. on data mining workshops* (IEEE, 2011), p. 573–580. DOI: 10.1109/ICDMW.2011.178