

КОГНИТИВНЫЕ И СОЦИОГУМАНИТАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.821;343.98

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МНОГОМЕРНОГО ШКАЛИРОВАНИЯ СЭММОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

© 2022 г. В. А. Орлов¹, *, Ю. И. Холодный¹

¹ *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия*

**E-mail: Orlov_VA@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2021 г.

После доработки 14.01.2022 г.

Принята к публикации 17.01.2022 г.

Работа продолжает цикл публикаций, посвященных теоретическим и прикладным аспектам нейрокриминалистики, и представляет, в частности, результаты изучения возможности использования метода многомерного шкалирования Сэммона для оценки физиологической активности человека в процессе его исследования с применением полиграфа в условиях функциональной магнитно-резонансной томографии и создания на базе такой оценки классификатора для диагностики личностно значимой для этого человека информации. На базе анализа кожно-гальванических реакций показана принципиальная возможность применения метода в указанных целях и высказана целесообразность продолжения исследований в указанном направлении.

DOI: 10.56304/S2782375X22010168

ВВЕДЕНИЕ

Исследования с применением полиграфа (ИПП) в целях диагностики наличия у человека скрываемой им информации осуществляют с 1930-х годов, в настоящее время их используют около сотни стран мира [1]. В ходе ИПП с исследуемым человеком проводят тесты, состоящие из специально подобранных, сформулированных и сгруппированных вопросов, на которые у него возникают физиологические реакции в форме изменений в динамике дыхания, активности сердечно-сосудистой системы и электрических свойств кожи. Далее специалист по ИПП (полиграфолог), осуществив совместную регистрацию вегетативных реакций, представленную на бумаге или на экране компьютера в виде полиграммы, и оценив зарегистрированные реакции на заданные вопросы, выносит суждение о факте наличия или отсутствия сокрытия человеком той либо иной информации. Очевидно, что оценка реакций, полученных в ответ на заданные человеку вопросы, является едва ли ни ключевым этапом, завершающим проведение ИПП.

Мировая практика за долгие десятилетия выработала несколько способов оценки полиграмм. Первой появилась и существует до сих пор экспертная качественная оценка полиграмм, когда полиграфолог выносит суждение о наличии реакций на вопросы субъективно, на основе своего опыта, без выполнения каких-то количественных измерений или оценок.

В середине XX века была создана экспертная балльная оценка полиграмм, когда полиграфолог выносит суждение о величине реакций на заданные вопросы субъективно, оценивая их в баллах по эмпирически установленной двух-, трех- или семибалльной шкале.

В начале 1980-х годов российские специалисты разработали экспертную метрическую оценку, при которой измерение реагирования человека на вопросы теста осуществлялось полиграфологом вручную (в миллиметрах или в пикселях), а полученные данные обрабатывались с применением методов математической статистики.

В середине 1980-х годов за рубежом и в СССР практически одновременно появились компьютерные полиграфы и “машинная” оценка полиграмм, в ходе которой обработка зарегистрированных в ходе ИПП данных осуществлялась компьютерами по тем или иным алгоритмам. Очевидное достоинство “машинной” оценки заключается в том, что она проводится независимо от полиграфолога; недостаток такой оценки – невозможность проверки ее надежности и объективности, поскольку такие алгоритмы являются, как правило, коммерческой тайной фирм, выпускающих компьютерные полиграфы [2].

Упомянутое несовершенство оценки полиграмм алгоритмами существующих компьютерных полиграфов привело в XXI веке к парадоксальной ситуации: вместо того чтобы направить усилия на разработку объективных способов

оценки, специалисты США, являющиеся старейшими и ведущими пользователями ИПП в мире, пошли по пути совершенствования балльных методов оценки полиграмм, сохранив тем самым субъективный экспертный подход [3, 4]. Это, в частности, послужило одной из причин того, что американская криминалистика до сих пор не признает ИПП в качестве криминалистического метода, хотя органы полиции и спецслужбы США уже многие годы являются пользователями полиграфа в правоохранительной практике [5].

Отечественными специалистами разработаны собственные алгоритмы обработки полиграмм [6, 7], однако вопрос совершенствования объективных, научно обоснованных методов оценки реакций, регистрируемых в ходе ИПП, продолжает оставаться актуальным как в России, так и за рубежом. Объективные методы оценки полиграмм оказались также востребованными в Национальном исследовательском центре (НИЦ) «Курчатовский институт» при проведении нейрокогнитивных исследований различного целевого назначения, в ходе которых осуществлялось совместное использование функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и МРТ-совместимого полиграфа (МРТсП) [8].

В рамках поиска новых подходов к оценке полиграмм было признано целесообразным изучить возможность использования метода многомерно-го шкалирования Сэммона (МШС), который был эффективно применен в НИЦ «Курчатовский институт» при анализе данных, полученных в ходе фМРТ (фМРТ-данных). В частности, в основу исследования была положена гипотеза о возможности ранжирования предъявляемых человеку стимулов по их субъективной значимости путем оценки его физиологических реакций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Основой экспериментального изучения прикладных возможностей применения МШС явились физиологические данные, зарегистрированные МРТсП при проведении тестов со скрываемым именем (ТСИ) в ходе фМРТ-исследований [9]. Как было показано в исследованиях [10], сильной стороной использования алгоритмов МШС при обработке «многомерных» экспериментальных данных являются наглядность представления результатов исследования, возможность увидеть тенденцию развития изучаемого в эксперименте процесса и выделить доминирующую характеристику (т.е. ось), которая объективно вытекает из природы обработанных данных.

Существуют различные меры, позволяющие уменьшать размерность экспериментальных данных для их последующего графического представления, и одна из них определяет так называемое

мое отображение Сэммона, названное в честь Джона Сэммона-младшего, который первоначально предложил его в 1969 г. [11]. Мера, используемая отображением Сэммона, предназначена для минимизации различий между соответствующими межточечными расстояниями в двух пространствах — преобразование считается предпочтительным, если оно сохраняет (в максимально возможной степени) расстояние между каждой парой точек. Кроме того, алгоритм Сэммона гарантирует, что отображение не влияет или незначительно влияет на топологию.

Исходный набор данных представляется в виде N векторов в L -мерном пространстве, заданном X_i , $i = 1, 2, \dots, N$. В рамках решения задачи уменьшения размерности происходит отображение данных в d -мерное пространство ($d < L$), чтобы рассчитать векторы Y_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Для простоты запишем попарное расстояние между Y_i и Y_j как d_{ij} и аналогично d_{ij}^* для расстояния между X_i и X_j (Сэммон предполагал, что метрика здесь является Евклидовой, хотя это и не является строго обязательным условием). Величина структуры, присутствующей в исходном, но потерянной в преобразованном наборе данных, измеряется ошибкой E , определяемой как

$$E = \frac{1}{\sum_{i < j} d_{ij}^*} \sum_{i < j} \frac{(d_{ij}^* - d_{ij})^2}{d_{ij}^*}. \quad (1)$$

По сути ошибка представляет собой сумму квадратов разностей (до и после преобразования) в попарных расстояниях между точками. Суммы находятся в диапазоне $i < j$, так что каждое попарное расстояние подсчитывается один раз. Упомянутая выше тенденция к сохранению топологии обусловлена фактором d_{ij}^* в знаменателе главного суммирования, гарантирующем, что если исходное расстояние между двумя точками мало, то вес, придаваемый их квадратной разности, больше.

Для дальнейшего анализа в качестве меры расстояния между точками в многомерном пространстве была введена метрика — индекс различий вегетативных реакций исследуемого лица. Данная величина определялась как норма Фробениуса, рассчитанная для матриц, полученных с помощью преобразования Фурье, примененных к соответствующим эпохам экспериментальной сессии.

Для проверки гипотезы работоспособности алгоритма МШС в целях оценки полиграмм провели анализ кожно-гальванических реакций (КГР), зарегистрированных МРТсП в ходе ТСИ. Зарегистрированные КГР, возникающие в ответ стимулы различной значимости, могут быть представлены точками на плоскости таким обра-

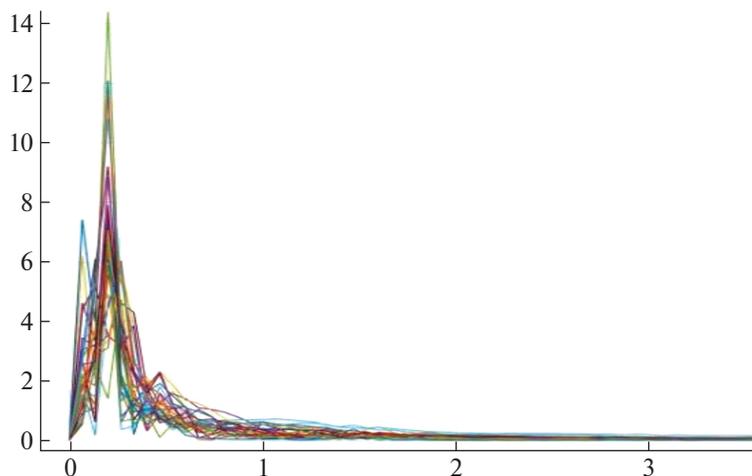


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика, построенная по данным КГР, отдельно для каждого предъявляемого стимула.

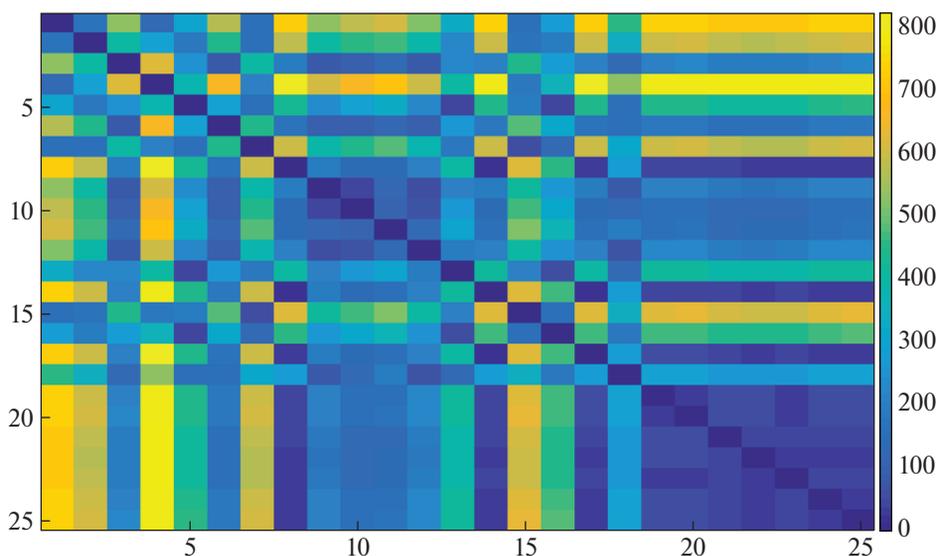


Рис. 2. Результирующая матрица индекса различий вегетативных реакций. По осям расположены номера предъявляемых стимулов в хронологическом порядке. Цветом кодируется ИРР между соответствующими стимулами. Однако такой вариант графического представления результатов анализа не является достаточно наглядным и при увеличении числа рассматриваемых стимулов перестает быть читабельным. Для решения вопроса наглядности представления получаемых результатов было принято решение использовать МШС.

зом, чтобы расстояния между точками максимально соответствовали вычисленным индексам различия этих реакций (ИРР).

Однако сами по себе сигналы не могут выступать в качестве ИРР. В качестве ИРР могут быть использованы различные математические метрики. Преобразование Фурье (ПФ) является математической операцией, широко применяемой при обработке цифровых сигналов. Суть преобразования заключается в переходе от амплитудно-временной шкалы к амплитудно-частотной. Другими словами, после применения преобразо-

вания Фурье сигнал представляется в виде суперпозиции синусоид с различными частотами. Результатом применения преобразования Фурье является амплитудно-частотная характеристика сигнала (АЧХ). Пример АЧХ, рассчитанной для одного испытуемого по всем КГР на предъявленные ему стимулы, приведен на рис. 1.

Из рисунка видно, что реакции на все предъявляемые стимулы лежат в определенном частотном диапазоне и различаются по амплитудным показателям. Каждая АЧХ представляет собой вектор значений. Таким образом, для расчета



Рис. 3. Двумерная карта, полученная после применения метода многомерного шкалирования Сэммона к матрицам ИРВР. Каждая точка в двумерном пространстве соответствует выраженности КГР на каждый предъявленный в ходе ТСИ стимул. Попарное расстояние между всеми точками отражает рассчитанные ИРР с погрешностью не более 0.001%. В ходе исследуемого теста персональную значимость имели стимулы, заканчивающиеся на цифру 4. Как видно из рисунка, все, кроме одного (стимула из пятого предъявления ТСИ – 5.4), значимые стимулы оказались рядом друг с другом в двумерном пространстве. Большая часть остальных стимулов оказалась в другой полуплоскости. Это говорит о том, что ИРР между значимыми стимулами значительно меньше, чем со всеми остальными.

ИРР были рассчитаны нормы Фробениуса для векторов, полученных попарным вычитанием соответствующих АЧХ. Результирующая матрица ИРР приведена на рис. 2.

Полученные матрицы ИРР используются в качестве входных данных для метода МШС, в результате которого получают двумерные карты распределения КГР для представления каждого из предъявляемых в ходе ТСИ стимулов. Пример такой карты приведен на рис. 3: оси на рисунке являются абстрактными и не имеют смыслового содержания.

В силу специфики используемого алгоритма МШС результирующие отображения (конstellации) находятся с точностью до аффинных преобразований (поворота, отражения и параллельного переноса). Хотя и форма, и геометрические размеры полученных карт остаются неизменными (при сохранении входных данных), такие особенности метода делают невозможным прямое сравнение и математическое усреднение получаемых отображений для различных показателей. Для решения этой проблемы в настоящее время ведется разработка алгоритма нормализации и стандартизации получаемых карт. Несмотря на указанную выше проблему, представленные в работе результаты показывают сильную кластеризацию данных по принципу персональной значимости – большая часть не значимых стимулов принадлежит одной полуплоскости, а значимых – другой.

По итогам выполненного ИПП интегральные оценки могут быть получены для всех зарегистрированных МРТсП физиологических данных [8].

ВЫВОДЫ

Первая попытка применения описанного выше алгоритма для категоризации по степени личностной значимости стимулов оказалась удачной. Показана принципиальная возможность использования комбинации преобразования Фурье, нормы Фробениуса и метода МШС для разделения различных групп стимулов. Вместе с тем предложенный алгоритм требует доработки в части расширения списка анализируемых показателей (например, амплитуда фотоплетизмограммы, частота сердечных сокращений, амплитуда и частота грудного и брюшного дыхания и т.д.) и стандартизации получаемых в результате МШС карт. Работы в указанном направлении будут продолжены.

Представленный в данной публикации материал получен в ходе инициативного внутреннего исследования, проводимого НИЦ “Курчатовский институт” (приказ № 2752 от 28 октября 2021 г.; тема – “Нейрокогнитивные исследования”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодный Ю.И. Применение полиграфа при профилактике, раскрытии и расследовании преступлений: Монография. М.: Мир безопасности, 2000.
2. Холодный Ю.И. Криминалистическая психофизиология // Психофизиология. Под ред. Ю.И. Александрова. 5-е издание. СПб: Питер, 2021, С. 481.
3. Krapohl D.J., Show P.K. Fundamentals of polygraph practice. San Diego: Academic Press, 2015. 348 p.
4. Nelson R. // J. Sci. Field Practice. 2020. V. 49. № 2. P. 157.

5. Strengthening forensic science in the United States: a path forward. Washington, D.C., The National Academy Press, 2009. 354 p.
6. Леонтьев К.А., Панин С.Д. // Юридическая психология. 2014. № 2. С. 33.
7. Леонтьев К.А., Панин С.Д., Холодный Ю.И. // Журнал “Наука и образование”. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 10 октября; <http://technomag.bmstu.ru/doc/728906.html>. <https://doi.org/10.7463/1014.0728906>
8. Ковальчук М.В., Холодный Ю.И., Карташов С.И. и др. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2020. Т. 1. № 1. С. 112.
9. Kholodny Y.I., Kartashov S.I., Malakhov D.G., Orlov V.A. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 149. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65596-9>
10. Орлов В.А. Дисс. “Построение модели когнитивного пространства человека по данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ)”... канд. физ.-мат. наук. МГУ, Москва. 2021.
11. Sammon J.W. // IEEE Transactions on Computers. 1969. V. C—18. № 5. P. 401.