

Borisova Olga Sergeevna
E-mail: olya_borisova@list.ru.

Momot Tatyana Valerievna
E-mail: star@tsure.ru.

УДК 004.415.2

А.М. Унакафов, О.А. Лушняк

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КОЖНО-ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ
РЕАКЦИЙ НА БОЛЕВЫЕ РАЗДРАЖИТЕЛИ**

В настоящей работе проводится экспериментальное исследование предложенной модели кожно-гальванических реакций на раздражители.

Кожная проводимость; электрические стимулы; габитуация.

А.М. Unakafov, O.A. Lushnyak

**RESEARCH OF THE GALVANIC SKIN RESPONSES TO DISCOMFORT
ELETROSTIMULI DYNAMIC MODEL**

This article is a continuation of the paper «Mathematical model of galvanic skin responses to painful stimuli». The paper is devoted to practical research of the offered model of the galvanic skin responses to electric shock dynamic.

Skin conductance response; electric shock; habituation.

Настоящая работа посвящена исследованию модели, предложенной в статье «Математическая модель кожно-гальванической реакции на болевые раздражители», публикуемой в текущем номере журнала.

Для оценки кожно-гальванических реакций (КГР) на серию из n болевых раздражителей, подаваемых в моменты времени t_i , предлагается использовать функцию $\tilde{S}_R(t)$, вычисляемую по следующей формуле:

$$\tilde{S}_R(t) = \begin{cases} 0, t \notin \bigcup_{i=1}^n \overline{(t_i + \tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau} + 1) \dots (t_i + \tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau} + \tilde{T})} \\ \tilde{A}_0 e^{-\sqrt{(i-1)h}} \tilde{F}(t - t_i - \tilde{\tau}_0 - i\Delta\tilde{\tau}), t \in \bigcup_{i=1}^n \overline{(t_i + \tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau} + 1) \dots (t_i + \tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau} + \tilde{T})} \end{cases},$$

где $\tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau}$ – оценка задержки (т.е. длительности латентного периода) реакции на i -й раздражитель, \tilde{T} – оценка длительности реакции на i -й раздражитель, $\tilde{A}_0 e^{-\sqrt{(i-1)h}}$ – оценка амплитуды реакции на i -й раздражитель; вектор $\tilde{F}_i = \langle F(1), \dots, F(\tilde{T}) \rangle^T$ задает форму КГР; $\tilde{\tau}_0$ – оценка задержки, а \tilde{A}_0 – амплитуды начальной (первой) реакции на раздражитель; h – характеристика скорости изменения амплитуды, а $\Delta\tilde{\tau}$ – задержки реакций в связи с привыканием к действию раздражителя.

В ходе проведения исследований для измерения КГР использовался программно-аппаратный комплекс «ИНТЭНС» [3]. Он обеспечивает измерение кож-

ной проводимости с помощью постоянного тока 2,5 мкА. Частота дискретизации КГР составила 25 Гц. Уровень дискомфортных электростимулов (пачки коротких высокоамплитудных электрических импульсов [1]) настраивался индивидуально, на уровне порога переносимости боли в диапазоне 8–150 В (64 шага регулировки). Электрод для подачи электростимулов размещался на запястье.

В эксперименте участвовали 28 человек (17 мужчин, 11 женщин, средний возраст – 20,2±1,7 года). Из исследования были исключены женщины, находившиеся в менструальной фазе менструального цикла.

Исследование состояло из четырех этапов.

На первом этапе проводилось анкетирование и психологическое тестирование участников исследования с использованием опросника Айзенка. Выделялись люди с чистыми значениями темперамента по Айзенку, кроме того производилось разделение на спортсменов (мастера, кандидаты в мастера спорта, имеющие 1 и 2 спортивные разряды) и людей, не занимавшихся спортом.

На втором этапе проводился съем КГР $S^0(t)$ в течение четырех минут без подачи раздражителей. Данная процедура проводилась для оценки спонтанных реакций участников исследования. По окончании процедуры рассчитывалось среднее значение спонтанных КГР $\bar{S}_0 = \frac{1}{T_F} \sum_{t=1}^{T_F} S^0(t)$, где T_F – длительность процедуры, $T_F = 320c \cdot 25Гц = 6000$. Фиксировались значения амплитуд пяти максимальных спонтанных КГР $MaxS_i^0$, $i = \overline{1..5}$.

Третий этап исследования состоял из четырех процедур по четыре минуты каждая, включавших в себя измерение КГР человека $S^j(t)$ в ответ на пять подач электростимула с интервалом от 35 до 45 с. Процедуры проводились не чаще, чем один раз в день.

На основе полученных записей КГР по приведенному в статье «Математическая модель кожно-гальванической реакции на болевые раздражители» алгоритму рассчитывались индивидуальные для каждого участника исследования параметры модели КГР. Кроме того, рассчитывалось среднее соотношение амплитуд спонтанных реакций с амплитудами реакций на раздражители

$$k_{NS} = \frac{\sum_{i=1}^5 MaxS_i^0}{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^5 \max_{t=1..T} S^j(t_i + \tau_i + t)}$$

где $MaxS_i^0$ – амплитуды пяти максимальных спонтанных КГР, рассчитанные на втором этапе исследования. В случае $k_{NS} > 0,5$ делалось заключение о высоких спонтанных КГР.

На четвертом этапе проводилась процедура исследования КГР на раздражители, аналогичная тем, которые имели место на третьем этапе. Значения параметров КГР на электростимулы, рассчитанные по полученной записи, сравнивались со значениями, рассчитанными на третьем этапе исследования по предлагаемому алгоритму.

Для исследования математической модели реакций на раздражители использовались следующие характеристики:

1. Ошибка аппроксимации амплитуд КГР $E_{\Delta A_i^j} = A_i^j - e^{-h\sqrt{(i-1)}}$, где A_i^j – амплитуда КГР на i -й раздражитель j -й процедуры относительно реакции на первый раздражитель этой же процедуры: $A_i^j = \frac{\max_{t=1..T} S^j(t_i + \tau_i + t)}{\max_{t=1..T} S^j(t_1 + \tau_1 + t)}$, $i = \overline{1..n}$, $j = \overline{1..4}$, где

– задержка реакции на i -й раздражитель, T – длительность реакции. Оценивались максимальное по модулю значение ошибки $\max_{i,j} |E_{\Delta A_i^j}|$ и среднеквадратическое

отклонение ошибок $\sqrt{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^5 (E_{\Delta A_i^j})^2}$, так как предполагается, что ошибки являются случайной величиной.

2. Ошибка предсказания амплитуд КГР $Ep_{\Delta A_i} = A_i^5 - e^{-h\sqrt{(i-1)}}$, где A_i^5 – амплитуда КГР на i -й раздражитель пятой процедуры, не использовавшейся при настройке параметров модели. Оценивались максимальное по модулю значение ошибки $\max_i |Ep_{\Delta A_i}|$ среднее по модулю значение ошибки $\sum_{i=1}^5 |Ep_{\Delta A_i}|$ и модуль средней ошибки $\left| \sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta A_i} \right|$.

3. Ошибка аппроксимации задержек реакции $E_{\Delta \tau_i^j} = \tau_i^j - (\tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau})$, где τ_i^j – задержка реакции на i -й раздражитель j -й процедуры. Оценивались максимальное по модулю значение ошибки $\max_{i,j} |E_{\Delta \tau_i^j}|$, среднее по модулю значение ошибки $\sum_{i=1}^5 |Ep_{\Delta \tau_i}|$.

4. Ошибка предсказания задержек реакции $Ep_{\Delta \tau_i} = \tau_i^5 - (\tilde{\tau}_0 + i\Delta\tilde{\tau})$, где τ_i^5 – задержка реакции на i -й раздражитель пятой процедуры, не использовавшейся при настройке параметров модели. Оценивались максимальное по модулю значение ошибки $\max_i |Ep_{\Delta \tau_i}|$, среднее по модулю значение ошибки $\sum_{i=1}^5 |Ep_{\Delta \tau_i}|$ и модуль средней ошибки $\left| \sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta \tau_i} \right|$.

5. Средняя ошибка предсказания $E_S = \frac{1}{T_F} \sum_{t=1}^{T_F} |S^5(t) - \tilde{S}_R(t)|$.

Диапазоны значений перечисленных показателей, использовавшиеся при оценке работы модели с точки зрения качества аппроксимации данных, на основе которых рассчитывались параметры модели, представлены в табл. 1, а с точки зрения качества предсказания параметров КГР – в табл. 2.

Таблица 1

**Диапазоны значений параметров, используемые при оценке
аппроксимационных свойств модели**

Параметр	Диапазон значений, соответствующих хорошей аппроксимации	Диапазон значений, соответствующих приемлемой аппроксимации
$\max_{i,j} E_{\Delta Ai}^j $	[0; 0,10) процентов	[0,10; 0,15] процентов
$\sqrt{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^5 (E_{\Delta Ai}^j)^2}$	[0; 0,15) процентов	[0,15; 0,20] процентов
$\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^5 E_{\Delta \tau i}^j $	[0; 0,05) с	[0,05; 0,08] с
$\max_{i,j} E_{\Delta \tau i}^j $	[0; 0,10) с	[0,10; 0,15] с

Таблица 2

**Диапазоны значений параметров, используемые при оценке
предсказательных свойств модели**

Параметр	Диапазон значений, соответствующих хорошему предсказанию	Диапазон значений, соответствующих приемлемому предсказанию
$\sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta Ai} $	[0; 0,05) процентов	[0,05; 0,08] процентов
$\left \sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta Ai} \right $	[0; 0,10) процентов	[0,10; 0,12] процентов
$\max_i Ep_{\Delta Ai} $	[0; 0,15) процентов	[0,15; 0,20] процентов
$\left \sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta \tau i} \right $	[0; 0,10) с	[0,10; 0,20] с
$\sum_{i=1}^5 Ep_{\Delta \tau i} $	[0; 0,20) с	[0,20; 0,30] с
$\max_i Ep_{\Delta \tau i} $	[0; 0,40) с	[0,4; 0,15] с
E_S	[0; 1,5 \bar{S}_0] Сименс	(1,5 \bar{S}_0 , 2 \bar{S}_0] Сименс

Если значение хотя бы одного параметра модели не соответствовало «хорошей» работе, качество работы модели оценивалось как приемлемое. Если значение хотя бы одного параметра модели не соответствовало «приемлемой» работе, качество работы модели оценивалось как неудовлетворительное.

Результаты исследования модели представлены в табл. 3, 4 и 5. Следует отметить, что результаты аппроксимации несколько лучше, чем результаты предсказания (что естественно). При этом из 8 человек, для которых наблюдались хорошие результаты аппроксимации, только у одного не было зафиксировано хороших результатов предсказания, что подтверждает корректность выбранных правил оценки модели.

Таблица 3

Результаты исследования аппроксимационных свойств модели

Группа (количество человек)	Доля участников, у которых модель обеспечила хорошую аппроксимацию	Доля участников, у которых модель обеспечила приемлемую аппроксимацию
Всего (28)	29 %	39 %
Мужчины (17)	35 %	35 %
Женщины (9)	22 %	45 %
Холерики (10)	30 %	40 %
Сангвиники (8)	38 %	25 %
Флегматики (5)	20 %	40 %
Спортсмены (15)	27 %	27 %
Не занимавшиеся спортом (13)	31 %	54 %
Люди с высокими спонтанными КГР (9)	11 %	22 %
Люди с низкими спонтанными КГР (19)	37 %	47 %

Таблица 4

Результаты исследования предсказательных свойств модели

Группа (количество человек)	Доля участников, у которых модель обеспечила хорошее предсказание	Доля участников, у которых модель обеспечила приемлемое предсказание
Всего (28)	29 %	21 %
Мужчины (17)	35 %	24 %
Женщины (9)	22 %	22 %
Холерики (10)	40 %	20 %
Сангвиники (8)	38 %	25 %
Флегматики (5)	0 %	20 %
Спортсмены (15)	20 %	13 %
Не занимавшиеся спортом (13)	38 %	31 %
Люди с высокими спонтанными КГР (9)	0 %	22 %
Люди с низкими спонтанными КГР (19)	42 %	21 %

Таблица 5

Результаты исследования комплексной эффективности модели

Группа (количество человек)	Хорошая эффективность модели	Приемлемая эффективность модели	Неудовлетворительная эффективность модели
Всего (28)	29 %	21 %	50 %
Мужчины (17)	35 %	24 %	41 %
Женщины (9)	22 %	22 %	56 %
Холерики (10)	30 %	20 %	50 %
Сангвиники (8)	38 %	25 %	37 %

Окончание табл. 5

Группа (количество человек)	Хорошая эффективность модели	Приемлемая эффективность модели	Неудовлетворительная эффективность модели
Флегматики (5)	0 %	20 %	80 %
Спортсмены (15)	20 %	13 %	67 %
Не занимавшиеся спортом	31 %	38 %	31 %
Люди с высокими спонтанными КГР	0 %	22 %	78 %
Люди с низкими спонтанными КГР	37 %	25 %	38 %

Следует отметить ряд фактов, представляющих особый интерес.

1. Эффективность модели существенно зависит от уровня спонтанных КГР человека: у людей с низкими спонтанными КГР модель имеет удовлетворительную эффективность в 60 % случаев, что заметно выше, чем в целом по группе. Этот результат вполне естественен: чем выше спонтанные КГР, тем в меньшей степени измеряемая кожная проводимость может быть объяснена реакциями на раздражитель.

2. У мужчин была зафиксирована лучшая эффективность модели, чем у женщин, при этом из 7 мужчин, у которых модель оказалась неэффективной, у 6 наблюдались высокие спонтанные КГР. В то же время, из 5 женщин, у которых модель оказалась неэффективной, высокие спонтанные КГР наблюдались только у одной.

Таким образом, из 10 мужчин, у которых не наблюдалось высоких КГР, эффективность модели оказалось неудовлетворительной только у одного.

3. Низкая эффективность модели у спортсменов может быть связана с тем, что у них привыкание к болевому раздражителю носит характер, несколько отличный от других людей [2,4], и предлагаемая модель может недостаточно адекватно его оценивать.

4. Низкая эффективность модели у флегматиков может быть статистически недостоверной в силу малого объема группы.

В заключение следует отметить, что предлагаемая модель представляется достаточно эффективной для людей с невысокими спонтанными КГР, прежде всего – для мужчин. Представляется целесообразным дальнейшее исследование и уточнение предлагаемой модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гринберг Я.З.* СКЭНАР-терапия и СКЭНАР-экспертиза. Некоторые аспекты // Рефлексология. – 2005. – № 3 (7). – С. 5-10.
2. *Середенко Л.П., Добровольская Н.А., Начатая Е.С., Власов Г.В., Калиновская Т.Н.* Методы экспрес-диагностики адаптационных возможностей спортсменов в процессе учебно-тренировочной деятельности // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту. – 2008. – № 6. – С. 213-217.
3. *Унакафов М.А.* Способ тренировки адаптационных механизмов личности к стрессовым ситуациям и устройство для его реализации. Описание изобретения к патенту Российской Федерации №2251972, МПК 7 А61В5/16 5/053, опубликованное 20.05.2005 г., бюлл. № 14.
4. *Yildiz A., Gulturk S., Cetin A., Erdal S., Arslan A.* The sympathetic skin response habituation in sedentary subjects and sportsmen *Clinical Autonomic Research.* – 2008. – № 18 (3). – P. 120-126.

Унакафов Антон Михайлович

Закрытое акционерное общество «ОКБ “Ритм”».

E-mail: anton@rista.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 99.

Тел.: 88634383963.

Лушняк Олеся Анатольевна

Кубанский государственный университет физической культуры, спорта и туризма.

E-mail kakcvetaeva@rambler.ru.

350015, г. Краснодар, ул. Буденного, 16.

Тел.: 88612553573.

Unakafov Anton Michailowich

Joint Stock Company «ОКБ “Ritm”».

E-mail: anton@rista.ru.

99, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634383963.

Lushnyak Olesya Anatol'evna

Kuban State University of Physical Education, Sport and Tourism.

E-mail kakcvetaeva@rambler.ru.

161, Budyonnogo street, Krasnodar, 350015, Russia.

Phone: +78612553573.

УДК 004.415.2

А.М. Унакафов

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЖНО-ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
НА БОЛЕВЫЕ РАЗДРАЖИТЕЛИ**

Разработана математическая модель кожно-гальванических реакций человека на дискомфортные электростимулы. Модель позволяет оценить динамику амплитуд и длительностей латентного периода реакций. Формулируется алгоритм индивидуальной настройки параметров модели.

Кожная проводимость; электрические стимулы; габитуация.

A.M. Unakafov

**MATHEMATICAL MODEL OF GALVANIC SKIN RESPONSES TO PAINFUL
STIMULI**

The paper is devoted to development of a mathematical model of the galvanic skin responses to electric shock. Model lets to estimate reactions' amplitudes and latencies dynamics. An algorithm of model parameters individual adjustment is presented.

Skin conductance response; electric shock; habituation.

Изучение особенностей реакций человека на действие различных раздражителей является актуальной, но не вполне решенной на сегодняшний день задачей. В частности, слабо исследованы реакции на дискомфортные раздражители. В настоящей работе предлагается модель кожно-гальванических реакций (КГР) человека на умеренное болевое воздействие – электрический стимул (электростимул).

В ходе экспериментов, на которых базируются предлагаемая модель, для оценки КГР использовалось измерение фазической составляющей кожной проводимости. Электростимулы подавались на запястье, их сила подбиралась индивидуально, на уровне порога переносимости боли. Зависимость КГР человека от вре-