

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА РЕЗУЛЬТАТ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНСТРУКЦИИ ЗДОРОВЫМИ ДОБРОВОЛЬЦАМИ

О.В. Кубряк, Е.Н. Панова, Е.А. Крикленко

Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина, г. Москва, Россия

Цель. В данном исследовании оценивалось влияние биологической обратной связи с разными параметрами на управляемость вертикальной позы человека для поиска физиологических обоснований выбора адекватного режима управления. **Материалы и методы.** Исследование было проведено на выборке, состоящей из 25 практически здоровых добровольцев в возрасте от 18 до 35 лет. Добровольцы не являлись профессиональными спортсменами. Основной методикой была оценка параметров биоуправления по опорной реакции на силовой платформе. **Результаты.** Нами выявлено, что увеличение глубины обратной связи в процедуре биоуправления по опорной реакции на силовой платформе с визуальным каналом снижает эффективность целевого управления вертикальной позой. Кроме того, был определен предельный диапазон повышения коэффициента преобразования физиологического сигнала (чувствительности) – для координат общего центра давления на опору, при котором сохраняется способность к целенаправленному управлению у нетренированных добровольцев, который ориентировочно составил 50–70 % от нормального. **Заключение.** Изменение глубины биологической обратной связи является ключевым фактором, влияющим на эффективность выполнения процедур с биологической обратной связью.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, параметры управления, визуальный контроль, моторный контроль, вертикальная поза, баланс тела, регуляция позы, прогноз воздействия, постурография, стабилометрия.

Введение. Проблема определения физиологически адекватной двигательной нагрузки [1], а также прогнозирования результата воздействия либо диагностики в случае применения систем с биологической обратной связью в разных биомедицинских областях (например [2]), не может быть решена без оптимизации [3] и, прежде всего, без ясной дифференциации фундаментальных характеристик проводимых процедур [4]. На наш взгляд, этот *актуальнейший вопрос* пока ещё не получил достаточного внимания экспертного сообщества.

Глубина искусственной обратной связи является одним из важных критериев биоуправления. Однако при использовании устройств от разных производителей или же применяя различные режимы процедуры для этих устройств, изменение глубины обратной связи может быть *подходящим или не подходящим для конкретной задачи*.

Из универсальной теории автоматического управления (например [5]) понятно, что параметры обратной связи влияют на стабильность схемы и устойчивость системы [6].

То есть в контексте современных кибернетических представлений [7] и «идеологически» близких, классических для отечественной физиологии системных теорий П.К. Анохина и Н.А. Бернштейна [8] это означает, что изменение связанных с меняющимися условиями сенсорного обеспечения параметров афферентации будет способствовать изменению центральной регуляции и, как следствие, параметров внешнего результата.

Наши представления, учитывающие в том числе различные практические сведения многих авторов (например [9]) и собственные более ранние наблюдения, указывают на ключевое влияние параметров визуального режима такой искусственной обратной связи на систему регуляции позы.

Данное исследование было нацелено на изучение влияния универсальной характеристики – меняющейся глубины биологической обратной связи по опорной реакции на внешний результат управления (стабильность вертикальной позы человека), а также на обоснование выбора режима подобных процедур в биомедицинских областях.

Материалы и методы. Наблюдение выполнялось в фитнес-клубе на 25 молодых, практически здоровых добровольцах, примерно одного уровня физической подготовки, перед активными занятиями. Средний возраст испытуемых составлял примерно 23 года. Из 25 добровольцев было 10 женщин и 15 мужчин. Все добровольцы были с нормальным зрением (без диагностированной патологии – по устному опросу). Курение со слов испытуемых было менее чем за час до процедуры; жажда, голод, применение медикаментов и алкоголя менее чем за сутки до наблюдения исключались. Наблюдение одобрено этической комиссией ФГБНУ «НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина».

Процедура наблюдения. После подписания протокола информированного согласия и общего инструктажа добровольцы обучались управлению меткой собственного общего центра давления на опору по визуальному каналу (на экране монитора) – до достижения понимания принципа управления. После минутного отдыха начиналось тестирование в следующих условиях и последовательности: (1) фаза «R1o»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, взгляд перед собой на черный экран, руки свободно вдоль тела – 1 минуту; (2) фаза «R1c»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, глаза закрыты, руки свободно вдоль тела – 1 минуту; (3) фаза «K = 15»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, взгляд перед собой на экран с меткой общего центра давления, руки свободно вдоль тела, в режиме биологической обратной связи по опорной реакции с глубиной обратной связи, характеризующейся увеличенным на 15 % от нормального коэффициентом преобразования – 1 минуту; (4), (5), (6) и (7) – аналогично предыдущему, но с увеличивающимися с шагом 15 % коэффициентами преобразования: коды «K = 30», «K = 45», «K = 60», «K = 75»; (8) и (9) – повтор фаз (1) и (2), обозначаемый кодами «R2o» и «R2c». В управляемых фазах требовалось удерживать метку-кружок в целевой зоне – центре круглой мишени. Между всеми фазами предусматривался минутный перерыв для отдыха.

Команды подавались автоматически голосом (динамика компьютера) и визуально (текст на экране) – в штатном программном обеспечении. Экран с диагональю 15" располагался в 1,5 метра на уровне глаз испытуемого. Посторонние шумы, изменения освещения

и другие помехи исключались условиями проведения.

Оборудование и программное обеспечение. Силовая (стабилометрическая) платформа: устройство электронное «СТАБИЛОТРЕНАЖЁР» ST-150 по ТУ 9441-005-49290937-2009, Россия; регистрационный номер медицинского изделия ФСР 2010/07900; свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.39.004.A N 41201; GMDN: 43114 Posturography management system platform. Компьютер с штатным программным обеспечением STPL, Россия; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в РФ № 2013610986; GMDN: 43115 Posturography system application software. Дополнительный 15"-дисплей на регулируемом штативе.

Внешние программы для подготовки и анализа данных: MS Excel 2010; SPSS 13.0.

Анализ данных проводился с использованием программы STPL, входящей в комплект программного обеспечения для силовой платформы ST 150. Оценивались показатели стабильности вертикальной позы и внешнего результата выполнения инструкции – стандартные характеристики, предусмотренные в программе STPL: «баллы» – количество регистрируемых (дискретных) удержаний метки общего центра давления в целевой зоне за период относительно максимально возможного результата, соответствующее качеству управления позой (выполнению инструкции) испытуемым; «Av» – энергоёмкость статокинезиограммы, миллиджоулей в секунду [10]. Принятый уровень значимости: 0,05. Описание выборки – показатели, связанные с фактическим распределением (квантили). Сравнение связанных данных – двухвыборочный тест Вилкоксона, для нескольких выборок – непараметрический аналог ANOVA, критерий Фридмана. Оценка типа распределений для факторного анализа – одновыборочный критерий типа Колмогорова – Смирнова. Мера выборочной адекватности – Кайзера – Мейера – Олкина. Анализ факторов – методом главных компонент, с вращением варимакс. Проверка нулевой гипотезы об отсутствии корреляций между параметрами – критерий сферичности Бартлетта. Полиномиальная интерполяция – кварта-полином.

Результаты. Наблюдались статистически значимые различия значений показателя стабильности позы (Av) – при анализе всей выборки испытуемых между фазами варианта пробы Ромберга (открытие и закрытие

глаз) до проведения сеанса с биоуправлением и после.

При сравнении идентичных периодов двух тестов до и после сеанса биоуправления различия наблюдались только для фаз с открытыми глазами. Р-значение для критерия знаковых рангов Вилкоксона составило 0,0005 при сравнении фаз R1с и R1о; 0,0004 – R2с и R2о; 0,0049 – R2о и R1о; 0,4274 – R2с и R1с.

Из анализа рангов следует, что при закрытых глазах показатель Av в выборке преимущественно увеличивался у испытуемых в сравнении с открытыми (R1с > R1о, R2с > R2о). После сеанса биоуправления его значение также повысилось для фаз с открытыми глазами (R2о > R1о).

Проверка возможных гендерных влияний в данной выборке: у женщин статистически значимые различия показателя Av есть только при сравнении фаз R2с и R2о (P = 0,005), где R2с > R2о. У мужчин статистически значимые различия найдены для всех сравниваемых пар, кроме R2с и R1с (P = 0,776), и где R1с > R1о; R2с > R2о; R2о > R1о. Таким образом, в данной выборке участие зрения в контроле позы у мужчин можно считать несколько более выраженным, чем у женщин.

При этом сравнительный анализ профилей результатов (Av) у женщин и у мужчин указывает на примерно равное качество контроля позы. Отличия касаются несколько большей вероятности снижения стабильности позы во время теста у женщин – пример на рис. 1, что, полагаем, связано с естественно большей лабильностью состояний в сравнении с мужчинами. Кроме того, не исключено, что отдельные различия в сенсорной организации в данной выборке обусловлены не выявленными особенностями зрения или иными причинами, не связанными напрямую с полом испытуемого.

Также из сравнения показателя Av в разных фазах теста, полагаем, следует, что сеанс биоуправления применявшегося типа вызывал у испытуемых адаптивное повышение участия зрения в моторном контроле.

Наблюдались следующие особенности автономной регуляции при изменении условий регулирования позы. Обеспечение выполнения инструкции в активных периодах наблюдения у женщин и мужчин имело некоторые особенности (рис. 2). Однако статистически значимых различий между связанными выборками значений показателя LF/HF

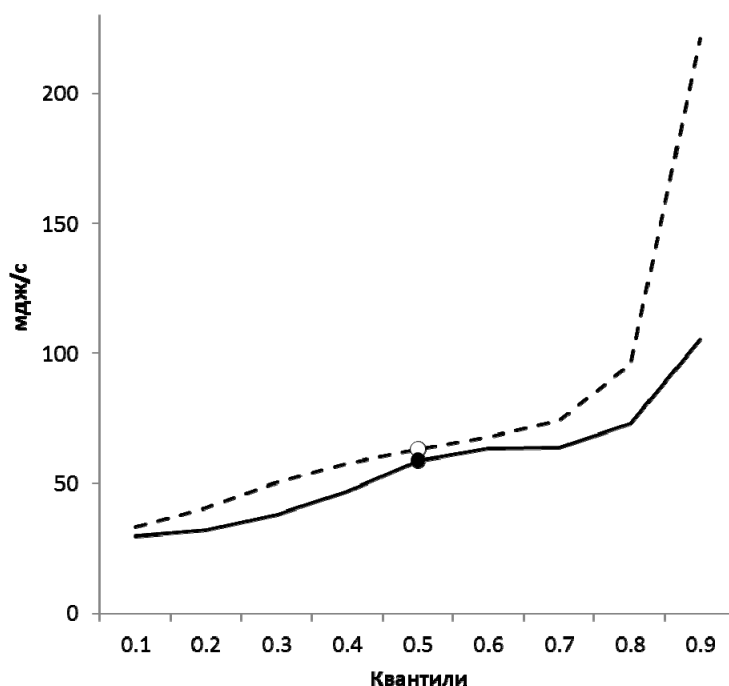


Рис. 1. Вероятностный профиль распределения значений Av за одну минуту при открытых глазах перед сеансом биоуправления в выборке (у женщин – пунктирной линией, у мужчин – сплошной).

Выделены медианы

Fig. 1. Probability profile of Av values distribution per minute with the eyes opened before the session of biocontrol (women – dashed line; men – solid line). Medians are highlighted

в разных периодах наблюдения по критерию Фридмана не отмечено – например, для 5 периодов активного этапа у женщин асимптотическая значимость составила 0,677; для всех 9 периодов – 0,214; аналогично и для мужчин. То есть можно полагать, что все испытуемые в процессе выполнения инструкции всех периодов наблюдения находились в достаточно ровном состоянии, не испытывая чрезмерных нагрузок, избыточного напряжения от процедуры или быстрого развития усталости, а возможные колебания показателя здесь, на наш взгляд, носили адаптивный или естественный хронобиологический характер.

Возможное влияние пола или, например, различного индивидуального «веса» зрения, или развития усталости, обучение здесь не являются основными факторами изменения качества моторного контроля с увеличением глубины обратной связи. Результаты факторного анализа – на рис. 3. Фаза «K=15» исключена, так как в этих условиях результат практически у всех был близок к максимальному – поэтому распределение результатов было отлично от нормального. Результаты при больших значениях K считались нормально распределенными – по критерию типа Колмогорова – Смирнова. Само изменение глубины обратной связи оказывало намного более мощное влияние, чем любые другие

факторы. Поэтому выборка из результатов 25 испытуемых здесь рассматривалась без гендерного или иного группирования.

Возрастание глубины обратной связи в заданных условиях вызывало выраженное снижение качества моторного контроля. Обобщённую характеристику влияния меняющейся глубины обратной связи (для визуальной метки) на качество управления вертикальной позой испытуемых выборки можно представить в виде интерполирующего полинома с очень высокой степенью детерминации ($R^2 = 1$):

$$p(x) = -3,375x^4 + 43,417x^3 - 191,63x^2 + 306,58x - 48.$$

Полином рассчитан на основе медианных значений результатов испытуемых при всех заданных значениях K. На рис. 4 представлена расширенная графическая интерполяция (кварта-полином), построенная по медиане и квартилям индивидуальных показателей выполнения инструкции.

Наша трактовка полученного описания функции: после первого резкого снижения качества управления позой с ростом значения K, адаптивная стабилизация контроля позы в данных условиях достигается в диапазоне увеличения значений K от нормального примерно на 50–70 %, после чего происходит полная потеря адекватного управления.

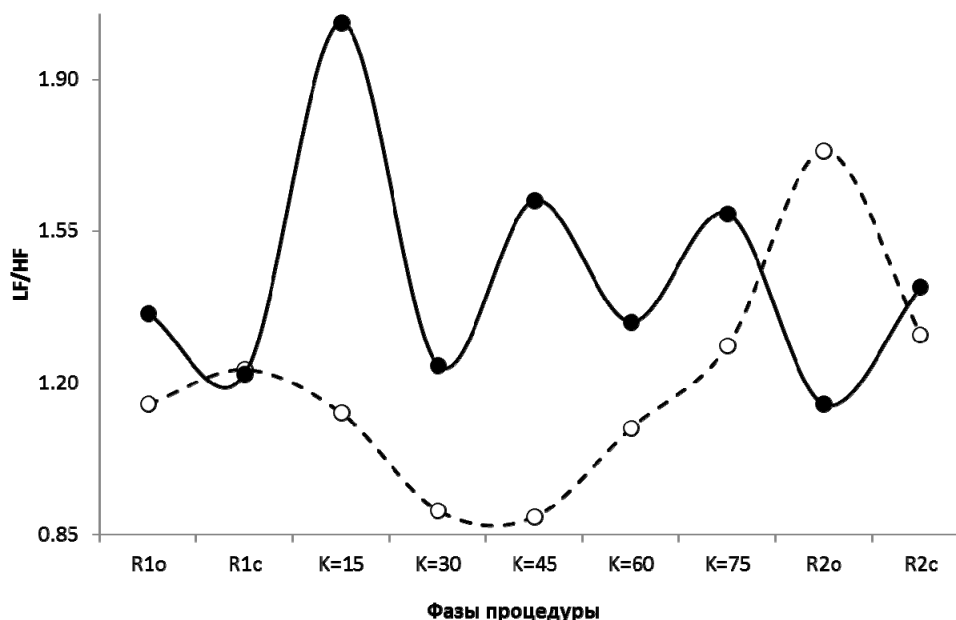


Рис. 2. Медианы показателя вегетативного баланса у мужчин и у женщин выборки в последовательных фазах процедуры наблюдения (у женщин – пунктирной линией, у мужчин – сплошной)

Fig. 2. Medians of vegetative balance in men and women during successive phases of monitoring (women – dashed line; men – solid line)

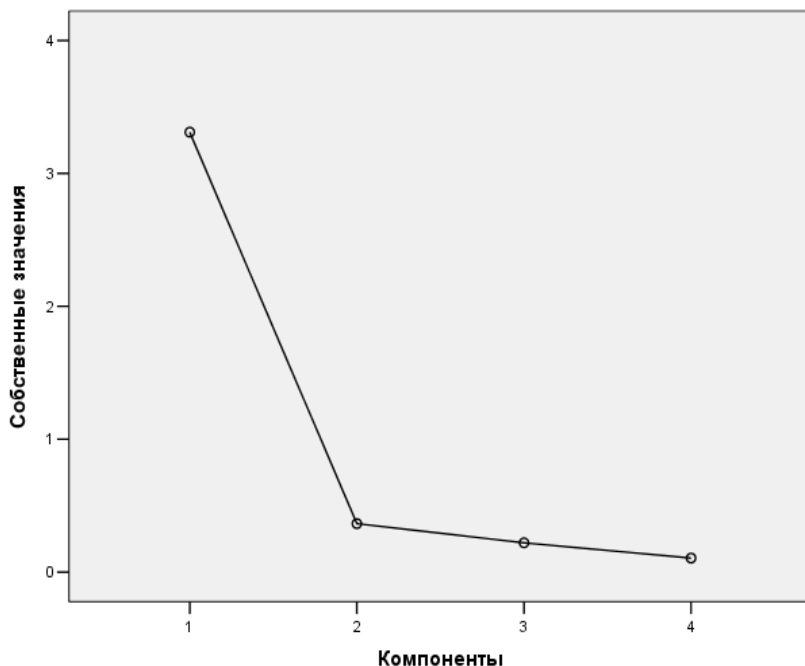


Рис. 3. Факторный анализ качества выполнения инструкции испытуемыми при изменении глубины обратной связи

Fig. 3. Factor analysis of the quality of instruction performance by subjects when changing the depth of feedback

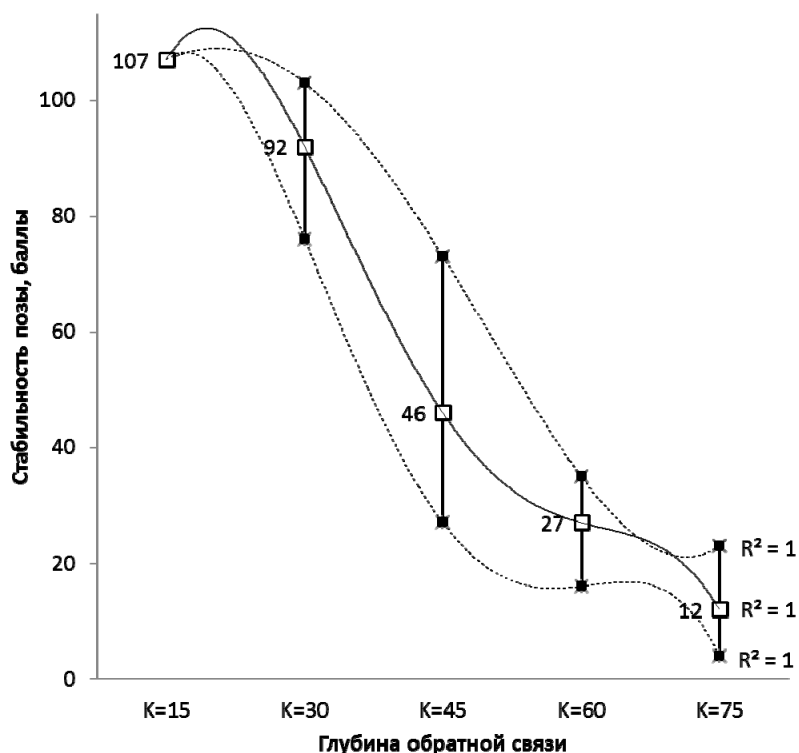


Рис. 4. Интерполяция функции контроля вертикальной позы при включенном визуальном канале биологической обратной связи по опорной реакции со ступенчатым увеличением глубины обратной связи

Fig. 4. Interpolation of the function of vertical position control with a visual channel of biological feedback using the ground reaction with a stepwise increase of feedback depth

Заключение. Глубина обратной связи в процедурах биоуправления является ключевым регулируемым фактором, влияющим на способность к выполнению инструкции и на соответствие самой процедуры задаче её применения. Иными словами, неверный подбор глубины обратной связи, например, при проведении медицинской реабилитации, по меньшей мере, снизит эффективность занятий. Упущение характеристики процедуры биоуправления – глубины обратной связи – препятствует адекватному сравнению эффективности применения тренингов с биологической обратной связью в разных исследованиях, проведению мета-анализа, разработке оптимальных режимов тренировок.

Увеличение глубины обратной связи снижает способность испытуемых к надежному управлению функцией. Ориентировочные границы диапазона критического снижения способности к адекватному управлению позой в режиме биологической обратной связи по опорной реакции у здоровых, нетренированных испытуемых определены в данной выборке повышением коэффициента преобразования целевого сигнала на 50–70 % от нормального.

Литература

1. Lohse, K.R. *Is more better? Using meta-data to explore dose-response relationships in stroke rehabilitation* / K.R. Lohse, C.E. Lang, L.A. Boyd // *Stroke*. – 2014. – Vol. 45 (7). – P. 2053–2058. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.004695
 2. Гроховский, С.С. *К вопросу о «дозе» двигательной реабилитации после инсульта: обзор* / С.С. Гроховский, О.В. Кубряк // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 66–71. DOI: 10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71
 3. Taylor, J.B. *Real-time optimized biofeedback utilizing sport techniques (ROBUST): a study protocol for a randomized controlled trial* / J.B. Taylor, A.D. Nguyen, M.V. Paterno et al. // *BMC Musculoskelet Disord*. – 2017. – Vol. 8 (1). – P. 71. DOI: 10.1186/s12891-017-1436-1
 4. van Gelder, L.M.A. *The use of biofeedback for gait retraining: A mapping review* / L.M.A. van Gelder, A. Barnes, J.S. Wheat, B.W. Heller // *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. – 2018. – Vol. 20 (59). – P. 159–166. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.09.020
 5. Юревич, Е.И. *Теория автоматического управления* / Е.И. Юревич. – Л.: Энергия, 1975. – 412 с.
 6. Еремин, Е.Л. *Комбинированная адаптивная система управления структурно и параметрически неопределенным нелинейным объектом* / Е.Л. Еремин, Е.А. Шеленок // *Проблемы управления*. – 2016 – № 3. – С. 23–31.
 7. Новиков, Д.А. *Кибернетика 2.0* / Д.А. Новиков // *Проблемы управления*. – 2016. – № 1. – С. 73–81.
 8. Леонтьев, Д.А. *Самоорганизация живых систем и физиология поведения* / Д.А. Леонтьев // *Мир психологии*. – 2011. – № 2 (66). – С. 16–27.
 9. Alharbi, A.A. *Effect of visual input on postural stability in young adults with chronic motion sensitivity: A controlled cross-sectional study* / A.A. Alharbi, E.G. Johnson, A.A. Albalwi et al. // *J Vestib Res*. – 2017. – Vol. 27 (4). – P. 225–231. DOI: 10.3233/VES-170534
 10. Grokhovskii, S.S. *A method for integral assessment of the effectiveness of posture regulation in humans* / S.S. Grokhovskii, O.V. Kubryak // *Biomedical Engineering*. – 2018. – Vol. 52, № 2. – P. 138–141. DOI: 10.1007/s10527-018-9799-7
- Кубряк Олег Витальевич**, доктор биологических наук, заведующий лабораторией физиологии функциональных состояний человека, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина. 125415, г. Москва, ул. Балтийская, 8. E-mail: o.kubryak@nphys.ru, ORCID: 0000-0001-7296-5280.
- Панова Елена Николаевна**, младший научный сотрудник лаборатории физиологии функциональных состояний человека, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина. 125415, г. Москва, ул. Балтийская, 8. E-mail: e.panova@nphys.ru, ORCID: 0000-0002-8449-716X.
- Крикленко Елена Александровна**, специалист, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина. 125415, г. Москва, ул. Балтийская, 8. E-mail: e.kriklenko@nphys.ru, ORCID: 0000-0002-9856-5426.

Поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

EFFECT OF BIOLOGICAL FEEDBACK DEPTH ON THE PERFORMANCE OF INSTRUCTION BY HEALTHY VOLUNTEERS

O.V. Kubryak, o.kubryak@nphys.ru, ORCID: 0000-0001-7296-5280,
E.N. Panova, e.panova@nphys.ru, ORCID: 0000-0002-8449-716X,
E.A. Kriklenko, e.kriklenko@nphys.ru, ORCID: 0000-0002-9856-5426
P.K. Anokhin Science Research Institute of Normal Physiology, Moscow,
Russian Federation

Aim. The study deals with the assessment of the effect of biological feedback with various parameters on controlling vertical position in human. This is necessary to justify physiologically the choice of an adequate control regime. **Materials and methods.** 25 apparently healthy volunteers aged 18–35 participated in the study. These volunteers are not professional athletes. The main method is the assessment of biocontrol parameters using the ground reaction data obtained with a force plate. **Results.** We revealed that an increase in feedback depth during the biocontrol assessed using the ground reaction data obtained with the force plate with a visual channel decreases the efficiency of vertical position targeted control. Moreover, we defined the extreme range of an increase in the coefficient of transformation of the physiological signal (sensitivity). This was done to obtain the coordinates of the common center of pressure on the ground, which preserves the ability of targeted control in untrained volunteers and equals approximately 50–70 % of standard values. **Conclusion.** Changes in the depth of biological feedback is a key factor, which influences the efficiency of procedures with biological feedback.

Keywords: biological feedback, control parameters, visual control, motor control, vertical position, body balance, position regulation, effects forecasting, posturography, stabilometry.

References

1. Lohse K.R., Lang C.E., Boyd L.A. Is More Better? Using Metadata to Explore Dose-Response Relationships in Stroke Rehabilitation. *Stroke*, 2014, vol. 45 (7), pp. 2053–2058. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.004695
2. Grokhovskiy S.S., Kubryak O.V. [On the Question of the Dose of Motor Rehabilitation after a Stroke]. *Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya* [Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation], 2018, vol. 17, no. 2, pp. 66–71. (in Russ.) DOI: 10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71
3. Taylor J.B., Nguyen A.D., Paterno M.V., Huang B., Ford K.R. Real-Time Optimized Biofeedback Utilizing Sport Techniques (ROBUST): a Study Protocol for a Randomized Controlled Trial. *BMC Musculoskelet Disord*, 2017, vol. 8 (1), p. 71. (in Russ.) DOI: 10.1186/s12891-017-1436-1
4. van Gelder L.M.A., Barnes A., Wheat J.S., Heller B.W. The Use of Biofeedback for Gait Retraining: A Mapping Review. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, vol. 20 (59), pp. 159–166. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.09.020
5. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The Theory of Automatic Control]. Leningad, Energy Publ., 1975. 412 p.
6. Eremin E.L., Shelenok E.A. [Combined Adaptive Control System of a Structurally and Parametrically Undefined Nonlinear Object]. *Problemy upravleniya* [Management Problems], 2016, no. 3, pp. 23–31. (in Russ.)
7. Novikov D.A. [Cybernetics 2.0]. *Problemy upravleniya* [Management Problems], 2016, no. 1, pp. 73–81. (in Russ.)
8. Leont'yev D.A. [Self-Organization of Living Systems and Physiology of Behavior]. *Mir psikhologii* [World of Psychology], 2011, no. 2 (66), pp. 16–27. (in Russ.)

9. Alharbi A.A., Johnson E.G., Albalwi A.A., Daher N.S., Cordett T.K., Ambode O.I., Alshehri F.H. Effect of Visual Input on Postural Stability in Young Adults with Chronic Motion Sensitivity: A Controlled Cross-Sectional Study. *J Vestib Res*, 2017, vol. 27 (4), pp. 225–231. DOI: 10.3233/VES-170534

10. Grokhovskii S.S., Kubryak O.V. A Method for Integral Assessment of the Effectiveness of Posture Regulation in Humans. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 138–141. DOI: 10.1007/s10527-018-9799-7

Received 15 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кубряк, О.В. Влияние глубины биологической обратной связи на результат выполнения инструкции здоровыми добровольцами / О.В. Кубряк, Е.Н. Панова, Е.А. Крикленко // Человек. Спорт. Медицина. – 2018. – Т. 18, № S. – С. 19–26. DOI: 10.14529/hsm18s03

FOR CITATION

Kubryak O.V., Panova E.N., Kriklenko E.A. Effect of Biological Feedback Depth on the Performance of Instruction by Healthy Volunteers. *Human. Sport. Medicine*, 2018, vol. 18, no. S, pp. 19–26. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm18s03
