

УДК 51-76, 612.821.89
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-33-38

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АСПЕКТОВ КОГНИТИВНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРСПЕКТИВОЙ

© А.Е. Руннова¹⁾, М.О. Журавлев¹⁾, Д.В. Лопатин²⁾

¹⁾ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: anefila@gmail.com

²⁾ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: 79107540080@ya.ru

Описаны подходы и дизайн экспериментальных работ по исследованию визуального восприятия человеком пространственно неоднозначных объектов. На базе комбинации подхода нелинейной динамики и статистической физики разработана математическая модель когнитивного распознавания неоднозначного объекта – куба Неккера. Теоретическая модель демонстрирует хорошее соответствие экспериментальным данным.

Ключевые слова: когнитивная психология; электроэнцефалография; моделирование; бистабильное восприятие

Данная работа относится к активно развивающейся области нейронауки и посвящена оценке когнитивного восприятия человеком неоднозначно определяемых изображений. Современный уровень развития подходов математического моделирования и вычислительной математики позволяет успешно решать сложные междисциплинарные задачи, направленные на предсказание поведения нейродинамических объектов [1–4], понимание механизмов регуляции или когнитивных процессов, а также на объективное выявление психофизиологических особенностей тестируемых людей как в случае оценки профпригодности, так и в медицинских целях [5–8].

Для получения исходных данных в рамках исследования проведены серии экспериментальных работ в строго формализованных условиях. Была рассмотрена ситуация восприятия человеком куба Неккера – изображения, неоднозначность восприятия которого как связана с пространственной перспективой и направлением взгляда, так и обусловлена когнитивным процессом принятия решения человеком [9–11]. Визуальное стимулирование с помощью подобных объектов часто применяется в экспериментальных и теоретических работах [12–14], позволяя исследовать характеристики и механизмы переключения восприятия человеком объекта (в случае куба Неккера – с левого на правый). «Переключение» является, в общем-то, сложным сильно нестационарным когнитивным процессом, включающим в себя как этап непосредственно восприятия объекта, так и этап принятия решения о его полярности.

В наших экспериментальных исследованиях приняли участие 30 условно здоровых неоплачиваемых добровольцев, мужчин и женщин, в возрасте от 20 до 30 лет, обладающих нормальным или компенсированным до нормального зрением. Экспериментальные работы проводились в утренние и дневные часы при естественном

освещении, регистрации всех данных велась после полноценного ночного отдыха добровольцев.

В рамках эксперимента использовались изображения куба Неккера с разной интенсивностью средних линий, примеры которых продемонстрированы на рис. 1а. Интенсивность I трех средних линий, сосредоточенных в левом внутреннем углу, была выбрана в качестве управляющего параметра и менялась в пределах $[0; 1]$. Интенсивность трех средних линий вблизи правого внутреннего угла была установлена как $(1 - I)$. Интенсивность контура куба Неккера не изменялась и была равна 1. Очевидно, что для значений управляющего параметра $I = 0$ и $I = 1$ практически всегда изображения воспринимаются как «левый» и «правый» кубы соответственно.

В ходе эксперимента добровольцу в случайной последовательности предъявлялись 6 кубов Неккера с различными I , меняющимися от $I = 15$ до $I = 85$. Куб демонстрировался в виде черных линий на белом фоне на экране компьютера. Между предъявлениями различных кубов участнику показывалось стационарное фоновое цветное изображение без каких-либо точек, привлекающих внимание испытуемого и заставляющих фиксировать взгляд. Время предъявления куба Неккера составляло 500–700 мс, пауза между двумя различными кубами составляла 1500–2000 мс. Все участники эксперимента были проинструктированы нажать левую или правую клавишу на пульте управления в зависимости от своего восприятия демонстрируемого объекта.

Каждая экспериментальная запись включала в себя по 10 мин. фоновых записей ЭЭГ добровольца до и после активной фазы с восприятием неоднозначных изображений. В целом длительность записи каждого эксперимента достигала 50 мин. Для каждого участника эксперимента была рассчитана вероятность узнавания каждого куба I как левого $P_L(I) = l(I)/(l(I) + r(I))$, где

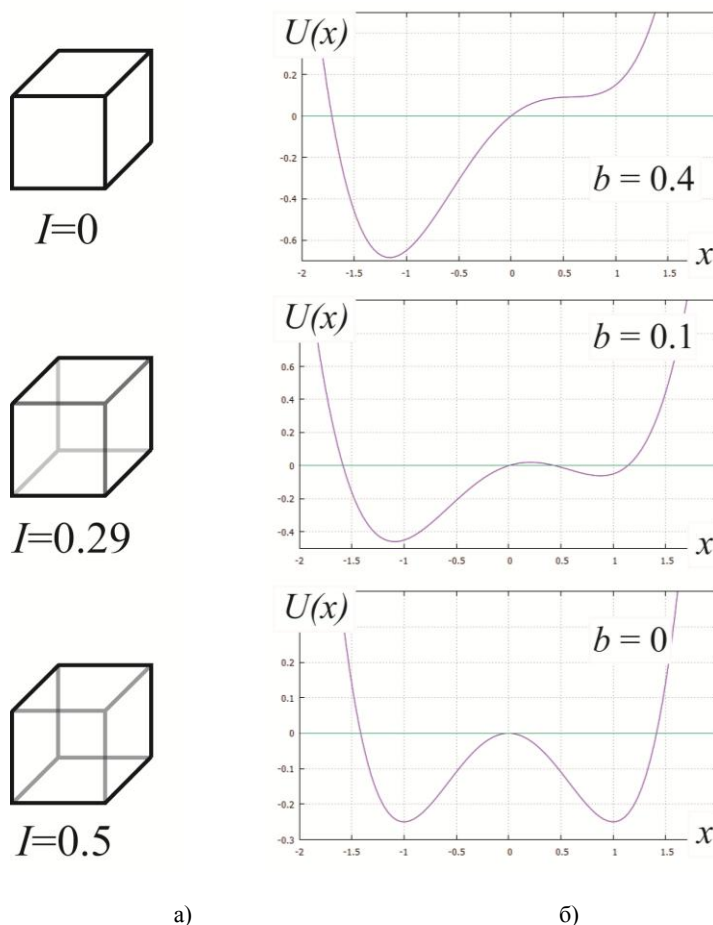


Рис. 1. а) примеры изображения куба Неккера с меняющимся параметром интенсивности граней I (параметром неоднозначности); б) вид потенциальной функции (1), используемой для моделирования сосуществования двух возможностей при распознавании куба Неккера

$l(I)$ и $r(I)$ – число нажатий на левую и правую кнопки соответственно.

Построение математической модели основано на подходе двух конкурирующих нейронных популяций [10–11]. Восприятие объекта «левым» или «правым» зависит от активности той или иной популяции соответственно. В таком случае можно промоделировать восприятие такого объекта как динамическую систему с двумя сосуществующими аттракторами – т. е., в простейшем случае, потенциальной системой с биквадратичным потенциалом, обладающим двумя устойчивыми точками $x_{l,r}$:

$$U(x) = \frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2} + bx. \quad (1)$$

Устойчивые точки $x_{l,r}$ будут соответствовать крайним («вырожденным») случаям кубов Неккера $I = 0$ и $I = 1$. Параметр b , отвечающий за линейный член потенциала, введен в выражение для описания выраженной индивидуальной составляющей восприятия объекта. Иными словами, один и тот же куб Неккера разные люди могут воспринимать как левый и как правый. Коэффициент b определяет форму и глубину потенциальных ям, как это показано на рис. 1б. Очевидно, что данный коэффициент варьируется от человека к человеку и, возможно, даже меняется в зависимости от его

психофизиологического состояния. Однако в настоящей работе мы попытаемся связать коэффициент b со следующим наблюдаемым в эксперименте явлением. Из объективной оценки исследуемого бистабильного объекта понятно, что куб Неккера с интенсивностью граней $I = 0,5$ испытуемый должен был бы с одинаковой вероятностью воспринимать как «левый» и как «правый». Однако в эксперименте оказывается, что это значение равновероятного куба никогда не равно 0,5 и меняется для каждого добровольца на некоторую величину ΔI . Произвольно введем взаимосвязь между параметрами b и ΔI следующим образом: $b = \Delta I/\alpha$. Отметим, что в этой взаимосвязи эмпирически определить мы можем лишь величину ΔI .

Тогда восприятие бистабильного объекта можно описать с помощью динамической системы с биквадратичным потенциалом, обладающим двумя устойчивыми точками [15–16]:

$$\dot{x} = -U'(x). \quad (2)$$

Состояние динамической системы (2) может быть описано как положение шара, находящегося на профиле с формой, определяемой (1). Глубина этих потенциальных ям определяется в нашей модели интенсивностью I предъявляемого куба Неккера.

Однако даже при поверхностном знакомстве с кубом Неккера становится понятно, что восприятие данного объекта является крайне нестабильным – практически всегда присутствует возможность спонтанного переключения одного и того же куба с «левого» на «правый» за короткое время. С точки зрения нашей динамической системы это значит, что в ней присутствует некое случайное воздействие, которое перебрасывает состояния из бассейна притяжения одного аттрактора к другому. Пользуясь аналогией шара на профиле, заставляет перемещаться шар из одной устойчивой точки (минимума) в другую (рис. 16). В таком случае перепишем выражение (2) в виде:

$$\dot{x} = -U'(x) + \chi_{noise}(t). \quad (3)$$

Тогда, переходя от (3) к записи выражения в стохастической форме:

$$dX = -U'(x)dt + dX_{noise}, \quad (4)$$

где $X_{noise}(t)$ описывается винеровским процессом, получаем, что решение уравнения (4) может быть получено из уравнения Фоккера–Планка для плотности вероятности $\rho(x,t)$ с неизвестным параметром D

$$\frac{\partial \rho_X(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [U'(x)\rho_X(x,t)] + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 \rho_X(x,t)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

После некоторых математических выкладок получаем следующее теоретическое выражение для плотности вероятности $\rho(x,t)$ [17]:

$$\rho(x) = \exp\left(-\frac{2U(x)}{D}\right). \quad (6)$$

Таким образом, можно теоретически предсказать, какова будет вероятность восприятия куба с интенсивностью I как левого:

$$\dot{P}_l = \int_{-\infty}^0 \rho(x) dx. \quad (7)$$

Подводя итог из выражений (1), (6) и (7), можно утверждать, что теоретически предсказуемая вероятность выбора \dot{P}_l является функцией трех параметров $\dot{P}_l = (\Delta I, \alpha, D)$. Параметр ΔI определялся прямым измерением из экспериментальных данных, а значения остальных индивидуальных параметров α и D подбирались по каждому испытуемому методами наилучшего приближения [18–21] путем минимизации ошибки

$$E(\alpha, D) = \sum_{j=1}^N [P_l(\Delta I_j) - \hat{P}_l(\Delta I_j, \alpha, D)]^2. \quad (8)$$

Типичный вид поверхности $E(\alpha, D)$ показан на рис. 2а. Рис. 2б демонстрирует контуры на плоскости (α, D) , соответствующие зависимости E . Интересно, что для всех проведенных экспериментов удалось показать, что минимальное значение погрешности E достигалось с достижением условия

$$\alpha \cdot D = X_p = \text{const}. \quad (9)$$

На рис. 2в и 2г продемонстрированы результаты теоретического моделирования и экспериментальных

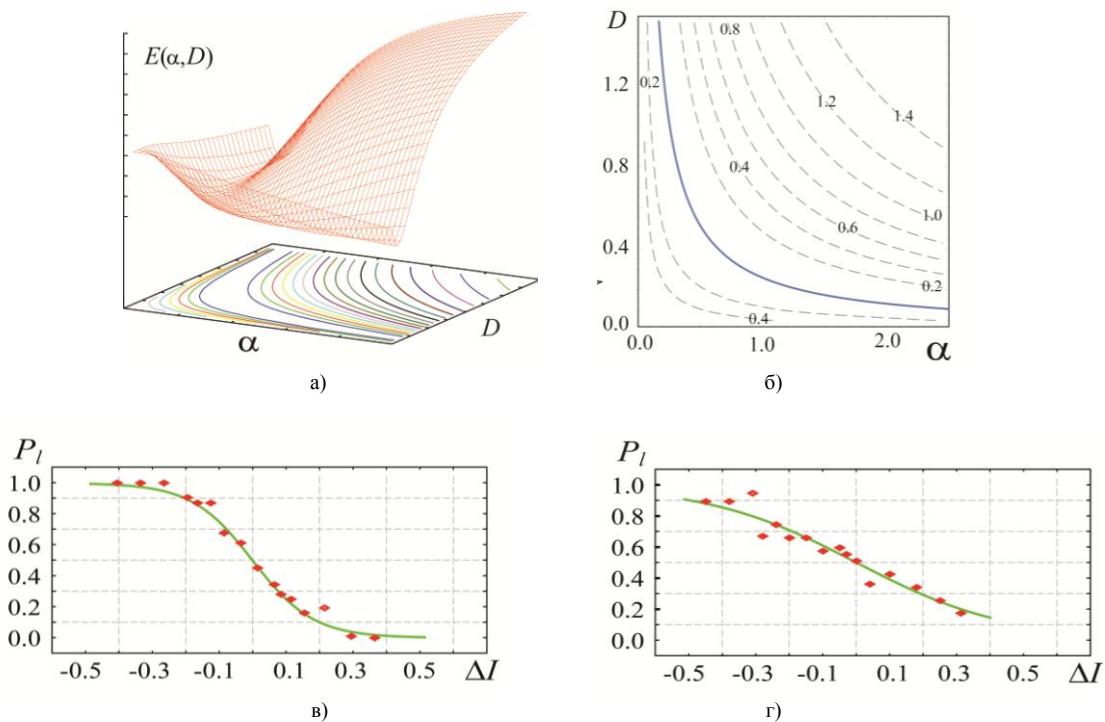


Рис. 2. а) поверхность значений ошибок $E(\alpha, D)$, полученная методом наименьших квадратов, вычисленная для испытуемого № 13; б) участок плоскости параметров (α, D) , соответствующий поверхности $E(\alpha, D)$. Сплошная линия представляет собой кривую $\alpha \cdot D = 0,255$, соответствующую минимальной погрешности $E_{\min} = 10^{-2}$; в, г) экспериментально измеренные зависимости вероятности восприятия иллюзии Неккера как левоориентированного куба P_l (точки) и соответствующие теоретические приближения \dot{P}_l (сплошные линии): в) $X_p = 0,31$; г) $X_p = 0,745$

Таблица 1

Значения интенсивности шумовой компоненты X_p , измеренные экспериментально, и минимальная погрешность E_{\min} , характеризующая отклонение теоретически промоделированной вероятности \hat{P}_l от наблюдаемой в эксперименте P_l

№ п/п	X_p	E_{\min}	№ п/п	X_p	E_{\min}
1	0,310	0,026	8	0,205	0,085
2	0,175	0,021	9	0,925	0,027
3	0,250	0,024	10	0,085	0,003
4	0,245	0,056	11	0,300	0,035
5	0,445	0,075	12	0,240	0,053
6	0,310	0,076	13	0,255	0,010
7	0,195	0,049	Среднее значение	0,317	0,042

измерений восприятия куба Неккера с различными интенсивностями граней для двух различных добровольцев – с «большим» и «малым» уровнем когнитивного шума. В табл. 1 показаны найденные значения интенсивности индивидуальной характеристики «мозгового шума» X_p для 13 испытуемых и определенная величина минимальной погрешности E_{\min} , характеризующей отклонение теоретически предсказанной вероятности \hat{P}_l от рассчитанной из экспериментальных данных P_l .

Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных является убедительным доказательством адекватности предложенного подхода к моделированию процесса спонтанного распознавания при визуальном восприятии неоднозначных изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- van Luijelaar G., Lüttjohann A., Makarov V.V., Maksimenko V.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Methods of automated absence seizure detection, interference by stimulation, and possibilities for prediction in genetic absence models // Journal of Neuroscience Methods. 2016. V. 260. P. 144-158.
- Koronovskii A.A., Hramov A.E., Grubov V.V., Moskalenko O.I., Sitnikova E.Yu., Pavlov A.N. Coexistence of intermitencies in the neuronal network of the epileptic brain // Phys. Rev. E. 2016. V. 93. P. 032220.
- Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е., Журавлев М.О. Оценка степени синхронности режима перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду (модельные системы и нейрофизиологические данные) // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 8. С. 606-610.
- Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Макаров В.А., Овчинников А.А. Вейвлет-анализ в нейродинамике // УФН. 2012. Т. 182. № 9. С. 905-939.
- Williams J.M.G., Watts F.N., MacLeod C.M., Mathews A. Cognitive psychology and emotional disorders. Chichester: Wiley, 1997. 404 p.
- Clark D.A., Beck A.T. Cognitive theory and therapy of anxiety and depression: convergence with neurobiological findings // Trends in Cognitive Science. 2010. V. 14. P. 418-424.
- Robinson T.E., Berridge K.C. Addiction // Annu. Rev. Psychol. 2003. V. 54. P. 25-53.
- McManus F., Glenn D.P., Chadwick P. Biases in the processing of different forms of threat in bulimic and comparison women // Journal of Nervous and Mental Disease. 1986. V. 184. P. 547-554.
- Necker L.A. Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid // London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science. 1832. V. 1. № 5. P. 229-338.
- Leopold D.A., Logothetis N.K. Multistage phenomena: changing views in perception // Trends in Cognitive Sciences. 1999. V. 3. P. 254-264.
- Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The neural bases of multistable perception // Trends Cogn. Sci. 2009. V. 13. № 7. P. 310-318.
- Long G.M., Toppino T.C. Enduring interest in perceptual ambiguity: Alternating views of reversible figures // Psychological Bulletin. 2004. V. 130. № 5. P. 748-768.
- Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Magallon-Garcia C.D.A., Castillo-Morales C.O. Critical slowing down and noise-induced intermittency in bistable perception: bifurcation analysis // Biological Cybernetics. 2014. V. 108. P. 397.
- Kornmeier J., Hein C.M., Bach M. Multistable perception: When bottom-up and top-down coincide // Brain and Cognition. 2009. V. 69. № 1. P. 138-147.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K. Zero Lyapunov exponent in the vicinity of the saddle-node bifurcation point in the presence of noise // Phys. Rev. E. 2008. V. 78. P. 036212.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Ovchinnikov A.A., Boccaletti S. Length distribution of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. № 2. P. 026206.
- Короновский А.А., Куровская М.К., Храмов А.Е., Шурыгина С.А. Влияние шума на поведение осцилляторов вблизи границы синхронизации // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 10. С. 1-9.
- Wilson H.R. Computational evidence for a rivalry hierarchy in vision // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2003. V. 100. P. 14499.
- Wolberg J. Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 250 p.
- Grubov V.V., Runnova A.E., Kurovskaya M.K., Pavlov A.N., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Demonstration of brain noise on human EEG signals in perception of bistable images // Proc. SPIE. 2016. V. 9707. P. 970702.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., Pavlov A.N., Sitnikova E.Yu. Wavelets in Neuroscience. Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 318 p.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-29-08221, 16-32-00187).

Поступила в редакцию 23 июня 2016 г.

Руннова Анастасия Евгеньевна, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры автоматизации, управления и мехатроники, e-mail: anefila@gmail.com

Журавлев Максим Олегович, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн, e-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Лопатин Дмитрий Валерьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, e-mail: +79107540080@ya.ru

UDC 51-76, 612.821.89
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-33-38

THE MATHEMATICAL MODELING OF SOME ASPECTS OF COGNITIVE RECOGNITION OF COMPLEX OBJECTS WITH THE SPATIAL PERSPECTIVE

© A.E. Runnova¹⁾, M.O. Zhuravlev¹⁾, D.V. Lopatin²⁾

¹⁾ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77 Politekhnikeskaya St., Saratov, Russian Federation, 410054
E-mail: anefila@gmail.com

²⁾ Tambov State University named after G.R. Derzhavin
33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: 79107540080@ya.ru

The approach and design of experimental studies on the visual perception of the spatially ambiguous objects is presented. A mathematical model of the cognitive recognition of ambiguous object (Necker cube) is developed on the basis of a combination of approaches of nonlinear dynamics and statistical evaluations. The theoretical model shows good agreement with experimental data.

Key words: cognitive psychology; electroencephalography; simulation; bistable perception

REFERENCES

1. van Luijckelaar G., Lüttjohann A., Makarov V.V., Maksimenko V.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Methods of automated absence seizure detection, interference bystimulation, and possibilities for prediction in genetic absence models. *Journal of Neuroscience Methods*, 2016, vol. 260, pp. 144-158.
2. Koronovskii A.A., Hramov A.E., Grubov V.V., Moskalenko O.I., Sitnikova E.Yu., Pavlov A.N. Coexistence of intermittencies in the neuronal network of the epileptic brain. *Phys. Rev. E*, 2016, vol. 93, p. 032220.
3. Moskalenko O.I., Koronovskiy A.A., Khramov A.E., Zhuravlev M.O. Otsenka stepeni sinkhronnosti rezhima peremezhayushcheyasya fazovoy sinkhronizatsii po vremennomu ryadu (model'nye sistemy i neyrofiziologicheskie dannye) [The estimation of degree of synchronicity of mode of intercalary phase synchronization in timing series (model systems and neurophysiology data)]. *Pis'ma v Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki – JETP Letters*, 2016, vol. 103, no. 8, pp. 606-610. (In Russian).
4. Pavlov A.N., Khramov A.E., Koronovskiy A.A., Sitnikova E.Yu., Makarov V.A., Ovchinnikov A.A. Veyvlet-analiz v neyrodinamike [Wavelet analysis in neurodynamics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences*, 2012, vol. 182, no. 9, pp. 905-939. (In Russian).
5. Williams J.M.G., Watts F.N., MacLeod C.M., Mathews A. *Cognitive psychology and emotional disorders*. Chichester, Wiley, 1997. 404 p.
6. Clark D.A., Beck A.T. Cognitive theory and therapy of anxiety and depression: convergence with neurobiological findings. *Trends in Cognitive Science*, 2010. vol. 14, pp. 418-424.
7. Robinson T.E., Berridge K.C. Addiction. *Annu. Rev. Psychol.*, 2003, vol. 54, pp. 25-53.
8. McManus F., Glenn D.P., Chadwick P. Biases in the processing of different forms of threat in bulimic and comparison women. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 1986, vol. 184, pp. 547-554.
9. Necker L.A. Observations on some remarkable phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1832, vol. 1, no. 5, pp. 229-338.
10. Leopold D.A., Logothetis N.K. Multistage phenomena: changing views in perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 1999, vol. 3, pp. 254-264.
11. Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The neural bases of multistable perception. *Trends Cogn. Sci.*, 2009, vol. 13, no. 7, pp. 310-318.
12. Long G.M., Toppino T.C. Enduring interest in perceptual ambiguity: Alternating views of reversible figures. *Psychological Bulletin*, 2004, vol. 130, no. 5, pp. 748-768.
13. Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Magallon-Garcia C.D.A., Castillo-Morales C.O. Critical slowing down and noise-induced intermittency in bistable perception: bifurcation analysis. *Biological Cybernetics*, 2014, vol. 108, p. 397.
14. Kornmeier J., Hein C.M., Bach M. Multistable perception: When bottom-up and top-down coincide. *Brain and Cognition*, 2009, vol. 69, no. 1, pp. 138-147.
15. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K. Zero Lyapunov exponent in the vicinity of the saddle-node bifurcation point in the presence of noise. *Phys. Rev. E*, 2008., vol. 78, p. 036212.
16. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Ovchinnikov A.A., Boccaletti S. Length distribution of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise. *Phys. Rev. E*, 2007, vol. 76, no. 2, p. 026206.
17. Koronovskiy A.A., Kurovskaya M.K., Khramov A.E., Shurygina S.A. Vliyanie shuma na povedenie ostsillyatorov vblizi granitsy sinkhronizatsii [Noise impact on oscillator near synchronization border]. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki – Technical Physics*, 2009, vol. 79, no. 10, pp. 1-9. (In Russian).

18. Wilson H.R. Computational evidence for a rivalry hierarchy in vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, vol. 100, p. 14499.
19. Wolberg J. *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments*. Berlin, Springer-Verlag, 2006. 250 p.
20. Grubov V.V., Runnova A.E., Kurovskaya M.K., Pavlov A.N., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Demonstration of brain noise on human EEG signals in perception of bistable images. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9707, p. 970702.
21. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., Pavlov A.N., Sitnikova E.Yu. *Wavelets in Neuroscience*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2015, 318 p.

GRATITUDE: The work is fulfilled under support of Russian Fund of Fundamental Research (projects no. 16-29-08221, 16-32-00187).

Received 23 June 2016

Runnova Anastasiya Evgenevna, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Automation, Control and Mechatronics Department, e-mail: anefila@gmail.com

Zhuravlev Maksim Olegovich, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Electronics, Vibrations and Waves Department, e-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Lopatin Dmitriy Valerevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Mathematical Modeling and Information Technology Department, e-mail: +79107540080@ya.ru

Информация для цитирования:

Руннова А.Е., Журавлев М.О., Лопатин Д.В. Математическое моделирование некоторых аспектов когнитивного распознавания сложных объектов с пространственной перспективой // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 1. С. 33-38. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-22-1-33-38

Runnova A.E., Zhuravlev M.O., Lopatin D.V. Matematicheskoe modelirovanie nekotorykh aspektov kognitivnogo raspoznavaniya slozhnykh ob"ektov s prostranstvennoy perspektivoy [The mathematical modeling of some aspects of cognitive recognition of complex objects with the spatial perspective]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 33-38. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-33-38 (In Russian).