

Российский журнал Когнитивной науки

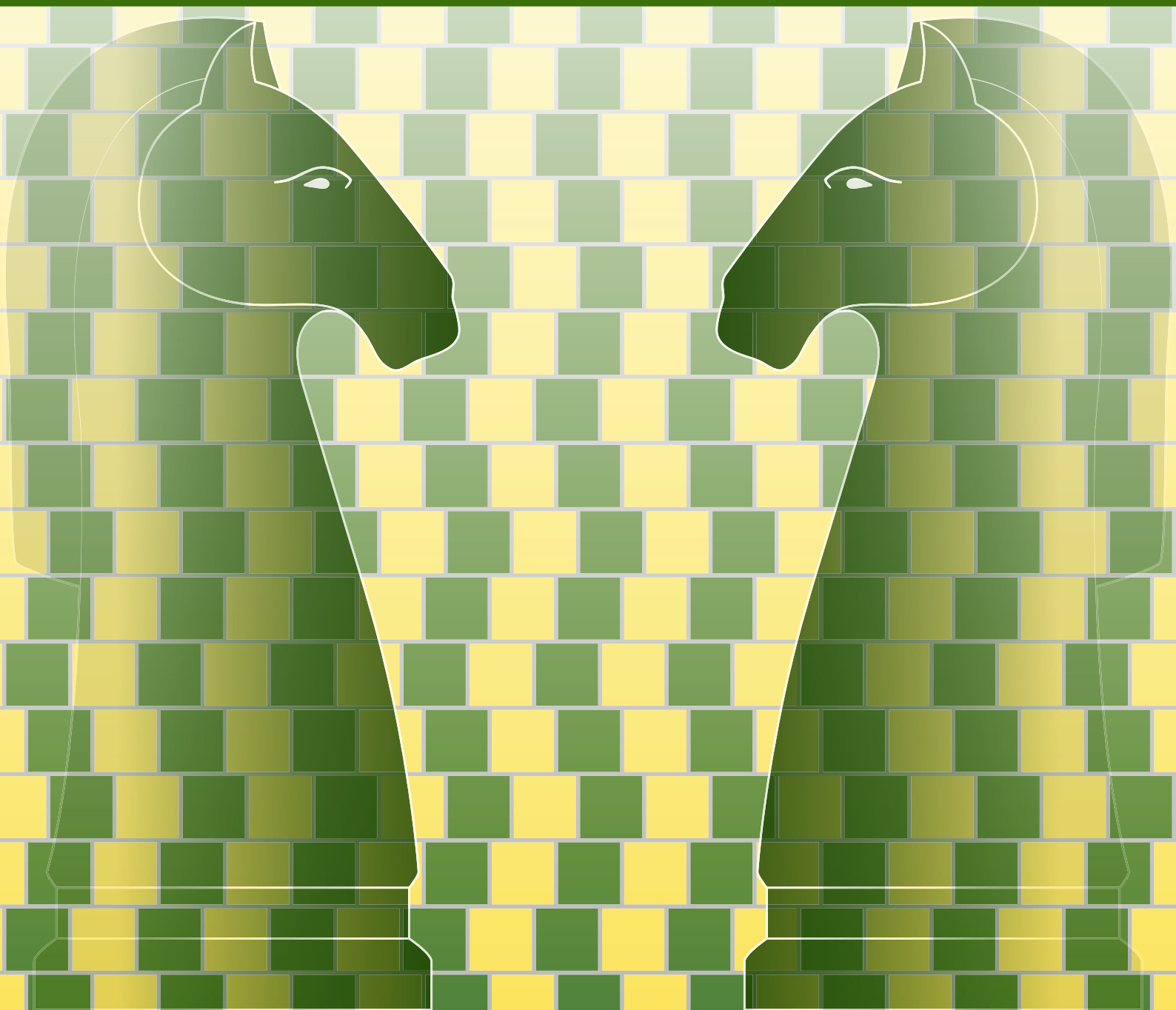
Том 2

№ 1

Март 2015

WWW.COGJOURNAL.RU

ISSN 2313-4518



WWW.COGJOURNAL.ORG

Vol. 2
No. 1

March 2015

THE RUSSIAN JOURNAL OF
COGNITIVE SCIENCE

The Russian Journal of Cognitive Science

<http://www.cogjournal.org/>

ISSN 2313-4518

Russian mass media certificate:

СМИ ЭЛ ФС 77 – 57220

Registered publisher: Ekaterina V. Pechenkova

Editorial office address: Yaroslavskaya ulitsa

13, office 229, 129366 Moscow, Russia

e-mail: info@cogjournal.org

Articles are distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Editor-in-Chief: Ekaterina V. Pechenkova

Editorial Board:

Tatiana V. Akhutina,
Mira B. Bergelson,
Olga V. Dragoy,
Varvara E. Dyakonova,
Maria V. Falikman,
Olga V. Fedorova,
Andrej A. Kibrik,
Andrei V. Kurgansky,
Dmitry V. Lyusin,
Regina I. Machinskaya,
Boris G. Meshcheryakov,
Vladimir F. Spiridonov,
Igor S. Utochkin,
Anna Yu. Shvarts,
Sergei L. Shishkin,
Nataliya A. Varako,
Roza M. Vlasova

Editors of the current issue:

E. V. Pechenkova, M. B. Bergelson
English copy editor: Kelly Callahan
Russian proofreader: P. G. Lebedeva

Layout designer: S. M. Zlochevsky

Cover design: E. D. Akopian, A. A. Akopian

Российский журнал когнитивной науки

<http://www.cogjournal.ru/>

ISSN 2313-4518

Свидетельство о государственной
регистрации СМИ ЭЛ № ФС 77 – 57220

Учредитель: Е.В. Печенкова

Адрес редакции: 129366 Москва,

ул. Ярославская, д. 13, офис 229

e-mail: info@cogjournal.org

Статьи доступны по лицензии [Creative Commons "Attribution" \(«Атрибуция»\) 4.0. всемирная](#), согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этих статей на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Главный редактор Е. В. Печенкова

Редакционный совет:

Т. В. Ахутина,
М. Б. Бергельсон,
Н. А. Варако,
Р. М. Власова,
О. В. Драгой,
В. Е. Дьяконова,
А. А. Кибрик,
А. В. Курганский,
Д. В. Люсин,
Р. И. Мачинская,
Б. Г. Мещеряков,
В. Ф. Спиридонов,
И. С. Уточкин,
М. В. Фаликман,
О. В. Федорова,
А. Ю. Шварц,
С. Л. Шишкин

Редакторы выпуска:

Е. В. Печенкова, М. Б. Бергельсон
Литературный редактор английских
текстов: Келли Кэллахан
Корректор русских текстов: П. Г. Лебедева

Компьютерная вёрстка: С. М. Злочевский
Дизайн обложки: Е. Д. Акопян, А. А. Акопян.

Contents

Editorial (in Russian)	4
------------------------------	---

Research papers

Mikhail V. Zotov, Natalia E. Andrianova, Alexey P. Voyt. Top-down and Bottom-up Joint Attention in Nonverbal Communication (in Russian)	6
Abstract in English	22
Roza M. Vlasova, Valentin E. Sinitsyn, Ekaterina V. Pechenkova. The Effect of Word Frequency on the Brain Correlates of Object Naming in Russian	24
Abstract in Russian	38

Methods

Andrey Chetverikov. Linear Mixed Effects Regression in Cognitive Studies (in Russian)	41
Abstract in English	50

Discussion

Alexey Krushinsky. The Cost of Problem Solving: Biophysical Background and Probable Evolutionary Consequences (in Russian)	52
Abstract in English	60
Andrei V. Kurgansky. Is the Brain Bound to Pay a Price for Cognition? Several concerns raised by A. L. Krushinsky's "The cost of problem solving: Biophysical background and probable evolutionary consequences" (in Russian)	62
Abstract in English	66
Alexander Kaplan. The Potential Variability of Neural Networks in the Context of L. V. Krushinsky's Ideas. Comments on Alexei Krushinsky's "The cost of problem solving: Biophysical background and probable evolutionary consequences" (in Russian)	67
Abstract in English	69
Aleksandr Ratushniak. Life as a Negentropy Information Process. Brief comments on Alexei Krushinsky's "The cost of problem solving: Biophysical background and probable evolutionary consequences" (in Russian)	70
Abstract in English	72

Current state of the field

Katerina Sapeha. Russian and Belarusian Research in Cognitive Psychology and Cognitive Science: a 2014 summary (in Russian)	73
Abstract in English	81

Оглавление

От редакции.....	4
------------------	---

Экспериментальные сообщения

Михаил В. Зотов, Наталия Е. Андрианова, Алексей П. Войт. «Нисходящее» и «восходящее» совместное внимание в невербальной коммуникации	6
Аннотация на английском языке.....	22
Роза Власова, Валентин Синицын, Екатерина Печенкова. Мозговые корреляты частотности слов при назывании объектов по картинкам на материале русского языка (на английском языке)	24
Аннотация на русском языке	38

Методы

Андрей Анатольевич Четвериков. Линейные модели со смешанными эффектами в когнитивных исследованиях	41
Аннотация на английском языке.....	50

Дискуссия

Алексей Крушинский. Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия.....	52
Аннотация на английском языке.....	60
Андрей Курганский. Должен ли мозг платить за решение задачи? Некоторые вопросы, возникшие по поводу статьи А. Л. Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия».....	62
Аннотация на английском языке.....	66
Александр Каплан. Потенциальная вариативность нейронных сетей мозга в контексте идей Л. В. Крушинского. Комментарии к статье А. Л. Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия».....	67
Аннотация на английском языке.....	69
Александр Ратушняк. Жизнь как негэнтропийный информационный процесс. Краткие комментарии к статье Алексея Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия».....	70
Аннотация на английском языке.....	72

Научная жизнь

Екатерина Сапего. Обзор публикаций российских и белорусских исследователей в сфере когнитивной психологии и когнитивной науки за 2014 г.....	73
Аннотация на английском языке.....	81

От редакции

Когнитивная наука по определению представляет собой междисциплинарную область исследований. Благодаря этому ученые-когнитивисты в последнее время из субъекта научного познания часто превращаются в его объект, поскольку междисциплинарное взаимодействие в науке само становится предметом специальных исследований. Ему посвящены научные труды и даже шестисотстраничная энциклопедия *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*. Однако сами ученые редко осмысливают свое сотрудничество в системе понятий, разработанных социологией науки. Знание о том, воплощает ли наше общение с коллегами мультидисциплинарный или трансдисциплинарный подход, или же о том, на какой стадии развития междисциплинарного сотрудничества по периодизации С. Сьоландера мы находимся, вряд ли поможет нам по-новому взглянуть на предмет нашего исследования¹.

Между тем продолжающаяся дифференциация научных дисциплин делает потребность в междисциплинарных контактах и связанные с этим проблемы все более насущными для каждого ученого. Если поколения наших предшественников существовали в мире высокоуровневых психологических, биологических и лингвистических теорий, направленных на объяснение строения, функционирования и развития мозга, психики и языка в целом, то нынешний мир науки — это скорее мир узких, раздробленных и хаотически пересекающихся областей. В этом мире теория обнаружения сигнала в психофизике развивается безо всякого взаимодействия с теорией обнаружения сигнала в медицине, специалист по нейрофизиологии человека может мало что знать о нервной системе беспозвоночных, а исследователь, занимающийся изучением зрительной рабочей памяти, может плохо представлять себе роль рабочей памяти в восприятии речи.

От раздробленности страдает как прогресс каждой отдельной области, так и научная картина мира в целом. В то же время у всех исследователей возрастает потребность в универсальной теории, способной непротиворечиво объяснять сразу множество уже известных явлений и предсказывать неизвестные. Хорошо понимая противоречия собственной научной отрасли, ученые часто ищут универсальные объяснения за ее пределами, на другом уровне анализа изучаемого объекта: лингвисты в психологии, психологи в биологии, биологи в химии и физике. Также представления, заимствованные из других дисциплин, кладутся в основу концептуальных метафор, задающих направление исследования. Для когнитивной науки хрестоматийным примером такой метафоры служит компьютерная метафора, которая способствовала, с одной стороны, развитию когнитивных исследований и нейронауки

за счет сравнения мозга с компьютером, а с другой — прогрессу в области компьютерных наук за счет знаний, полученных науками о мозге.

Представления, которые мы заимствуем из смежных дисциплин, могут оказаться продуктивными или вводить в заблуждение, но при этом практически неизбежно оказываются упрощенными или относятся к более ранним этапам развития науки. В связи с этим очень важная составляющая междисциплинарного общения заключается в комментировании заимствованных представлений и взаимном просвещении друг друга учеными из разных областей. Попытки стимулировать такую форму обсуждения предпринимались и на Московском семинаре по когнитивной науке, и на Международных конференциях по когнитивной науке.

В качестве пробного шага в этом направлении помимо основных статей, составивших текущий номер журнала и посвященных экспериментальным исследованиям совместного внимания с помощью метода регистрации движений глаз (статья Михаила Владимировича Зотова и коллег «Нисходящее» и «восходящее» совместное внимание в невербальной коммуникации»), нейролингвистическому исследованию мозговых коррелятов частотности слов с помощью метода фМРТ (статья Розы Михайловны Власовой и коллег «The effect of word frequency on the brain correlates of object naming in Russian») и применению нового для большинства российских когнитивистов метода линейных моделей со смешанными эффектами для статистического анализа данных (статья Андрея Анатольевича Четверикова «Линейные модели со смешанными эффектами в когнитивных исследованиях»), «Российский журнал когнитивной науки» в текущем выпуске предлагает читателям дискуссию о возможностях описания на языке теории информации тех изменений, которые происходят в мозге в связи с решением животным или человеком когнитивной задачи.

Основой для дискуссии стала статья ныне покойного Алексея Леонидовича Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия», предложенная им для публикации в журнале в 2014 году. К сожалению, Алексей Леонидович скончался, не успев доработать рукопись: 4 апреля исполняется полгода с того дня, как его не стало. Его последняя работа посвящена памяти его отца, Леонида Викторовича Крушинского, столетие со дня рождения которого биологическое сообщество отмечало в 2013 году. Будучи, как и его отец, биологом, Алексей Леонидович в основном занимался изучением проблем, далеких от термодинамики и теории информации: патологией поведения, вызванной акустическим стрессом, способами коррекции такой патологии, а также нейротопологическими исследованиями на насекомых. Вместе с тем его еще со школьных лет крайне интересовала возможность приложения физических представлений к объяснению работы мозга и возможные способы экспериментальной проверки таких предположений.

¹ На русском языке о стратегиях и стадиях развития междисциплинарного взаимодействия можно подробнее почитать в обзоре: Федорова О.В. А и Б сидели на трубе, или Междисциплинарность когнитивных исследований // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. №1(97). С. 19–34.

В связи с неоконченным характером работы и дискуссионностью предлагаемого в ней применения биофизических понятий к описанию информационных процессов в мозге статья публикуется вместе с комментариями нейробиологов и физиков. В первый номер журнала за 2015 год вошли комментарии А. В. Курганского, А. Я. Каплана и А. С. Ратушняка. Публикация материалов дискуссии будет продолжена в следующем номере. Мы надеемся, что интерес участников дискуссии к проблеме описания работы мозга в терминах теории информации найдет отклик у читателя.

*Екатерина Печенкова, главный редактор
«Российского журнала когнитивной науки»*

■ экспериментальные сообщения ■

«Нисходящее» и «восходящее» совместное внимание в невербальной коммуникации

Михаил В. Зотов

Санкт-Петербургский государственный университет

Наталья Е. Андрианова

Санкт-Петербургский государственный университет

Алексей П. Войт

Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация. Многие теории совместного внимания рассматривают его как низкоуровневый автоматизированный процесс прослеживания направления взгляда человека по ориентации его головы и глаз. Между тем ориентация головы и глаз человека является недостаточным источником информации об объекте его внимания. Проведен эксперимент, в ходе которого взрослые испытуемые выполняли задачу саккадической детекции объектов внимания участников невербальных коммуникативных сцен в двух условиях: (1) после просмотра видеофрагмента, позволяющего сформировать представление о контексте коммуникативной ситуации; (2) при отсутствии информации о коммуникативном контексте. Наряду с этим, варьировалось время экспозиции визуальной информации, необходимой для оценки направления взгляда персонажей. Испытуемые, обладавшие информацией о коммуникативном контексте, в отличие от лиц, не обладавших такой информацией, демонстрировали высокую эффективность идентификации и саккадической детекции «малозаметных» объектов внимания персонажей, независимо от степени доступности информации о направлении их взгляда. Результаты второго эксперимента показали, что при восприятии невербальных коммуникативных сцен испытуемые избирательно запоминают и поддерживают в памяти информацию о визуально-пространственных признаках стимулов, рассматриваемых в качестве потенциальных объектов внимания персонажей. В целом работа показала, что в невербальных коммуникативных ситуациях идентификация объектов внимания другого человека обеспечивается сложными высокоуровневыми процессами, сходными с процессами идентификации референтов речевых высказываний и указательных жестов.

Контактная информация: Михаил Владимирович Зотов, mvzotov@mail.ru; кафедра медицинской психологии и психофизиологии факультета психологии СПбГУ, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7–9.

Ключевые слова: совместное внимание, направление взгляда, невербальная коммуникация, зрительный поиск, движения глаз, коммуникативный контекст, социальная перцепция, «модель психического»

© 2015 Михаил В. Зотов, Наталья Е. Андрианова, Алексей П. Войт. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution" \(«Атрибуция»\) 4.0. всемирная](#), согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания авторов и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-06-00616 «Когнитивные механизмы зрительного восприятия ситуаций социального взаимодействия в норме и патологии».

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2015 г. Принята в печать 24 марта 2015 г.

Введение

Совместное внимание (*joint attention*), понимаемое как способность человека обращать внимание на те же объект или событие, на которые обращает внимание другой человек, имеет важнейшее значение для процессов коммуникации (Фаликман, 2006; Ахутина и др., 2013). Так, при построении высказывания говорящий обычно учитывает, какой объект (событие) или какие аспекты этого объекта (события) находятся в фокусе внимания собеседника (Ирисханова, 2014).

В современных исследованиях доминирует взгляд на совместное внимание как на относительно элементарный процесс прослеживания взором направления взора собеседника (*gaze following*) (Emery, 2000; Langton et al., 2000; Frischen et al., 2007). Многие работы опираются на концепцию Дж. Баттеруорта, постулирующую три утверждения: (1) совместное внимание является «одним из наиболее элементарных когнитивных процессов» (Butterworth, Jarrett, 1991, p. 71); (2) совместное внимание основывается на механизме экстраполяции линии взгляда, предполагающем, что идентификация объекта взгляда другого человека осуществляется на основе построения воображаемой линии в пространстве в соответствии с ориентацией его головы и глаз (там же); (3) реализация совместного внимания не требует выдвижения предположений о намерениях другого человека (там же).

Развивая эти утверждения, некоторые авторы сосредоточились на изучении таких вопросов, как степень точности, с которой люди способны оценивать угол направления взгляда другого человека (Bock et al., 2008), анализ вклада положения тела, поворота головы и ориентации глаз в определение линии взгляда (Todorovic, 2006; Langton et al., 2000) и т.п.

Во многих работах использовалась процедура «подсказки взглядом» (*gaze-cueing paradigm*), представляющая собой модификацию методики подсказки М. Познера. Данная процедура состоит в том, что сначала в центре экрана испытуемый видит реалистичное или схематичное изображение глаз или лица человека, смотрящего в правую или левую сторону. Затем в правой или левой части экрана появляется целевой стимул, на который испытуемый должен прореагировать. Установлено, что, даже зная о неинформативности лица как подсказки, люди непроизвольно ориентируют внимание на ту область экрана, на которую обращен взгляд изображенного человека (Friesen, Kingstone, 1998). На основе этих данных делается вывод о том, что совместное внимание обеспечивается автоматизированными процессами отслеживания направления взгляда (Friesen, Kingstone, 1998; Friesen et al., 2005; Frischen et al., 2007), являющимися «частью примитивного ориентировочного рефлекса» (Emery, 2000; Shepherd, 2010).

В то же время ориентация головы и глаз другого индивида является недостаточным источником информации об объекте его внимания. Немного изменим пример М. Томаселло (2011) и представим человека, взглянувшего на пробегающего мимо кролика. Как мы определим, что именно является объектом его внимания — сам кролик, его лапы, уши, бег и т.д.? Как мы определим, что объектом внимания человека явля-

ется именно кролик, а не любой другой объект (например, куст), находящийся на линии его взгляда? Между тем при повседневном общении мы легко идентифицируем объект внимания собеседника в условиях, когда его взгляд направлен на множество предметов. На чем может основываться такая идентификация?

Отвечая на этот вопрос, М. Томаселло и его сотрудники предлагают различать совместное внимание, ведомое «восходящими» (*bottom-up*) процессами, и совместное внимание, ведомое «нисходящими» (*top-down*) процессами (Томаселло, 2011; Carpenter, Liebal, 2011).

«Восходящее» совместное внимание (*bottom-up joint attention*) основывается на информации о перцептивных характеристиках стимулов. Если какой-либо стимул или событие, вследствие своей «заметности» (*saliency*), необычности и т.д., привлекает наше непроизвольное внимание, мы можем сделать вывод о том, что этот стимул или это событие также привлекает внимание нашего собеседника. Например, когда справа мы слышим звук разбивающейся чашки и видим, как собеседник поворачивает голову в этом направлении, мы делаем вывод о том, что его внимание, так же как и наше, привлечено этим событием. Если собеседник поворачивает голову вправо, и в зоне его взгляда наше внимание привлекает какой-то яркий или необычный предмет, мы можем сделать вывод, что именно на данный предмет обращено внимание собеседника. В эксперименте А. Боржи с соавторами (Borji et al., 2014; эксперимент 2) исследовалось распределение фиксаций взгляда испытуемых в процессе свободного рассматривания фотографических изображений людей, смотрящих на какие-либо предметы в своем окружении. Установлено, что испытуемые преимущественно фиксировали взгляд на «визуально ярких» (*salient*) объектах, расположенных в зоне взгляда наблюдаемых людей. Эту зону взгляда («*gaze map*») авторы предлагают рассматривать как конус в направлении взгляда наблюдаемого человека, вершина которого приходится на область его глаз. В свете обсуждаемой темы результаты эксперимента А. Боржи и соавт. можно интерпретировать следующим образом. Испытуемые не осуществляют тонкой дифференцированной оценки ориентации позы, головы и глаз наблюдаемого человека, позволяющей с точностью до нескольких градусов рассчитать линию его взгляда и идентифицировать расположенные на данной линии объекты. Вместо этого они проводят грубую, приблизительную оценку ориентации позы, головы и глаз наблюдаемого человека для выделения зоны его взгляда. Затем они идентифицируют попадающие в эту зону «заметные» объекты, к которым можно отнести предметы с высоким уровнем «визуальной яркости» (*visual saliency*) и биологически значимые объекты, например, лица людей.

«Нисходящее» совместное внимание (*top-down joint attention*) основывается на информации о смысловом контексте коммуникации, например, знании о том, что какой-либо предмет является новым или значимым для собеседника (но не для нас). В эксперименте Н. Ахтар, М. Карпентер и М. Томаселло (Akhtar et al., 1996) ребенок, его мама и экспериментатор играли с тремя новыми предметами. Потом мама выходила из комнаты. Экспериментатор извлекал четвертый новый пред-

мет и играл в него с ребенком до тех пор, пока этот предмет не терял для ребенка новизну. Когда мама возвращалась в комнату, она смотрела на все четыре предмета (расположенные рядом) и восклицала, обращаясь к ребенку: «Ух ты! Это же газзер! Газзер!», затем просила дать ей «газзер». Дети в возрасте 24 месяцев идентифицировали новый для мамы четвертый предмет как объект ее внимания и относили слово «газзер» именно к нему (несмотря на то, что для них самих все четыре предмета были в равной степени знакомы). В дальнейшем были реализованы различные модификации этого эксперимента (Tomasello, Haberl, 2003; Moll et al., 2006).

Замечательный эксперимент Н. Ахтар и соавторов позволяет сделать два вывода. Во-первых, идентификация объектов внимания другого человека тесно связана с определением референтов¹ его речевых выражений (в данном случае слова «газзер») и указательных жестов (в сходном эксперименте М. Томаселло и К. Хабберль (Tomasello, Haberl, 2003) мама указывала рукой на предметы). Во-вторых, такая идентификация предполагает способность к рассмотрению ситуации одновременно с нескольких точек зрения или перспектив. Действительно, чтобы определить объект внимания мамы, ребенок должен был реконструировать ее точку зрения и сопоставить с информацией, доступной с его собственной позиции («мама не знает о четвертой игрушке»). В терминах теории концептуальной интеграции Ж. Фоконые и М. Тернера (Fauconnier, Turner, 2002) ребенок выполняет операцию интеграции (*blending*) разных ментальных пространств (*mental spaces*), отражающих его позицию и точку зрения наблюдаемого человека («мама видела, что...»). Возникающее в результате интегрированное пространство (*blended space*) включает объекты/референты, одновременно индексированные в двух разных пространствах («игрушка новая для мамы» / «мама не видела игрушку»), что обеспечивает возможность выделения потенциальных объектов внимания другого человека.

Таким образом, проведенный анализ литературных данных показывает, что идентификация объектов зрительного внимания другого человека основывается на трех основных источниках информации. Во-первых, это перцептивная информация об ориентации позы, головы и ориентации глаз наблюдаемого человека, которая может обрабатываться с разной степенью детализации (требующей разных временных и ресурсных затрат) и позволяет с большей или меньшей точностью экстраполировать линию его взгляда. Во-вторых, это низкоуровневая информация о «заметных» (*salient*) объектах, присутствующих в зоне взгляда наблюдаемого человека. В-третьих, это высокоуровневая информация о потенциальных объектах внимания индивида, «вычисляемая» в результате реконструкции перспективы² наблюдаемого человека (*perspective-taking*, напр.: Erpley, Caruso, 2008) и ее сопоставления с информацией, доступной с позиции наблюдателя.

¹ Под термином «референт» понимается объект внеязыковой действительности, являющийся предметом обсуждения и/или взаимодействия участников коммуникативной ситуации.

² Термин «перспектива» используется в широком значении как позиция наблюдателя или точка зрения, которой придерживается наблюдатель, интерпретируя объекты и события (Ирисханова, 2014).

Как взаимодействуют процессы анализа признаков направления взгляда (*gaze direction cues*), восходящей (*bottom-up*) и нисходящей (*top-down*) обработки информации при идентификации объектов внимания наблюдаемых участников реальных коммуникативных ситуаций? Какому из указанных источников информации отдается приоритет в ситуациях конфликта, например, когда прогнозируемый объект внимания характеризуется малым размером, низким уровнем «визуальной яркости» и находится среди множества «ярких» объектов? С целью ответа на эти вопросы был проведен первый эксперимент.

Эксперимент 1

Испытуемые

В эксперименте приняли участие 74 здоровых испытуемых обоих полов в возрасте от 19 до 37 лет, которые были разделены на первую (N=18), вторую (N=18), третью (N=21) и четвертую (N=17) экспериментальные группы.

Дизайн и процедура эксперимента

Для исследования процессов совместного внимания была разработана экспериментальная процедура, представляющая собой сочетание задачи саккадической детекции (*saccadic detection task*) (Crouzet et al., 2010) и методики «подсказки взглядом» (*gaze-cueing paradigm*) (Friesen, Kingstone, 1998). Поскольку динамические стимулы по сравнению со статическими позволяют более эффективно отслеживать направление взгляда (Risko et al., 2012), в качестве «подсказки» испытуемым последовательно предъявлялись пять кадров, создающие впечатление поворота головы персонажа в ту или иную сторону. Объектом саккадической детекции являлся предмет, на который направлен взгляд персонажа. Процедура эксперимента представлена на рисунке 1.

При отсутствии какой-либо предварительной информации или сразу после просмотра видеофрагмента, позволяющего сформировать представление о контексте коммуникативной ситуации, испытуемые выполняли задачу саккадической детекции объекта внимания одного из персонажей. После фиксации взгляда в центре экрана им предъявлялась динамическая «подсказка», длительность экспозиции которой составляла 200 или 750 мс. Затем в течение 1500 мс предъявлялось целевое изображение — кадр сцены, ранее не виденный испытуемым. Задача испытуемого состояла в том, чтобы как можно быстрее перевести взгляд на объект, на который, по его мнению, смотрит персонаж. Другими словами, испытуемый должен был совершить саккаду от области лица персонажа к предполагаемому объекту его внимания. После окончания пробы он должен был назвать вслух данный объект.

Перед началом эксперимента все испытуемые выполняли тренировочное задание. Затем четыре группы испытуемых выполняли задачу в одном из условий: (1) наличие или отсутствие информации о контексте коммуникации; (2) короткое или длительное время

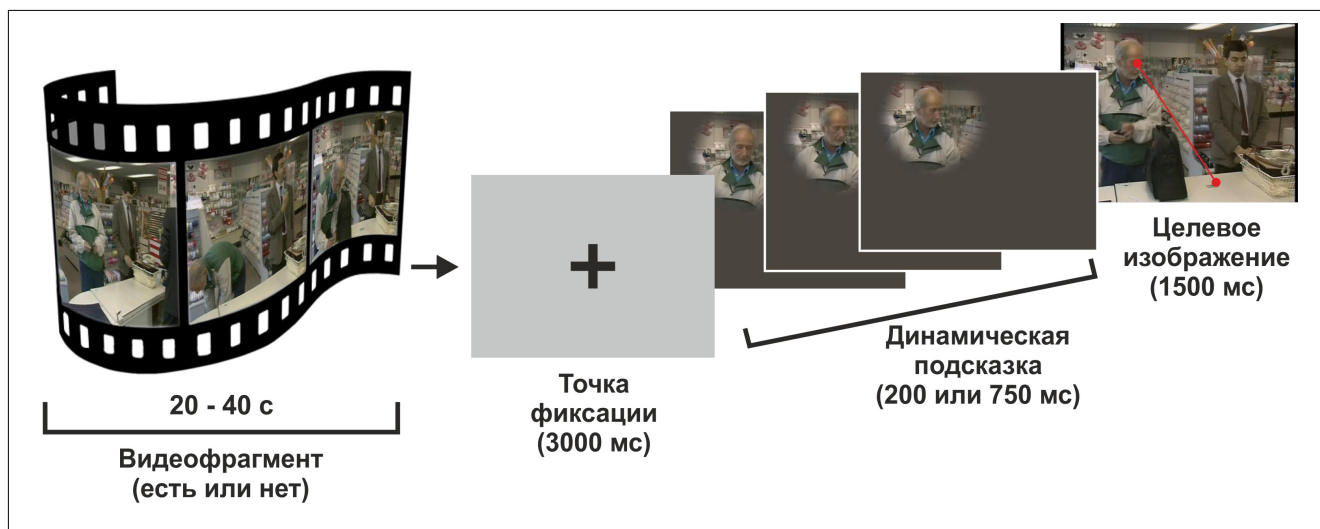


Рисунок 1. Задача саккадической детекции объекта внимания персонажа социальной сцены.

экспозиции информации, предоставляемой для визуальной оценки направления взгляда персонажа. Анализируются вербальные ответы испытуемых, локализация их зрительных фиксаций, угол отклонения первой саккады от линии взгляда персонажа, оцениваемой по объективным характеристикам изображения (то есть по ориентации позы, головы и глаз изображенного человека), а также время поиска объекта внимания персонажа, рассматриваемое как промежуток времени от момента предъявления целевого изображения до первой фиксации на целевом объекте.

Оборудование и стимульный материал

Стимулы предъявлялись на 19-дюймовом цветном ЖК мониторе с разрешением 1280×1024 точек. Расстояние от экрана до глаз испытуемого составляло 60 см. Угловые размеры предъявляемых видеофрагментов и кадров сцен составляли 25°×18°. Угловые размеры целевых стимулов (объектов внимания наблюдаемых персонажей) варьировали от 0.2° до 1.5°. Запись движений глаз осуществлялась при помощи системы регистрации движений глаз Tobii X120 (Tobii Technology, Швеция) с частотой 120 Гц (пространственное разрешение 0.3°). Перед выполнением каждой пробы испытуемый проходил процедуру калибровки. Распознавание зрительных фиксаций и саккад осуществлялось с помощью алгоритма «I-NMM» (Komogortsev et al., 2010). Из анализа были исключены данные трех испытуемых, записи движений глаз которых оказались невалидными.

В качестве стимульного материала использовались пять видеофрагментов социальных ситуаций из телесериала «Мистер Бин» (Великобритания, 1990–95), художественных фильмов «Новые времена» (США, 1936), «Собачья жизнь» (США, 1918) и «Пугало» (США, 1920) длительностью от 20 до 40 с.

Ситуация № 1 (телесериал «Мистер Бин»). У кассы супермаркета стоят два покупателя: пожилой мужчина и Мистер Бин. Мужчина отдает продавцу скидочную карту, в то время как Мистер Бин достает аналогичную карту и демонстрирует ее зрителю. Продавец возвращает мужчине скидочную карту (кладет ее перед ним на прилавок), но последний не замечает

этого. Мистер Бин кладет свою карту на прилавок рядом с картой мужчины. Не замечая своей карты, покупатель ставит на нее сумку. Видеокадр прерывается в тот момент, когда мужчина делает начальное движение по направлению к прилавку; и зритель ожидает, что вместо своей карты он ошибочно возьмет карту Мистера Бина. *Задача:* основываясь на оценке поворота головы покупателя, определить объект его внимания.

Ситуация № 2 (фильм «Новые времена»). Маленький бродяга (Ч. Чаплин) помогает мастеру чинить заводской пресс. Мастер просит его подержать инструмент и пиджак. Не подумав, бродяга кладет их под пресс. Когда мастер включает пресс, герой успевает выхватить из-под него инструмент, но забывает про пиджак. Пресс опускается. Видеокадр прерывается в тот момент, когда пресс поднимается; и зритель ожидает, что оба персонажа увидят испорченный пиджак мастера. *Задача:* основываясь на оценке поворота головы героя Ч. Чаплина, определить объект его внимания.

Ситуация № 3 (фильм «Собачья жизнь»). Маленький бродяга (Ч. Чаплин) замечает стоящего за забором торговца сосисками. Просунув руку через щель в заборе, бродяга ворует сосиску и готовится ее съесть. Проходящий мимо полицейский замечает факт воровства и останавливается, наблюдая через забор за действиями бродяги. Видеокадр прерывается в тот момент, когда бродяга начинает поворачивать лицо к забору; и зритель ожидает, что он заметит полицейского. *Задача:* основываясь на оценке поворота головы бродяги, определить объект его внимания.

Ситуация № 4 (фильм «Пугало»). У одного из братьев (Б. Китон) болит зуб. Второй брат предлагает ему его вырвать. Один конец веревки он привязывает к больному зубу героя Б. Китона, второй конец — к ручке двери. Затем он выходит из дома и становится по другую сторону двери, в то время как персонаж Б. Китона с привязанным зубом находится внутри дома у внутренней стороны двери. Второй брат резко открывает дверь от себя. Дверь бьет персонажа Б. Китона по лицу, но не вырывает его зуб. Раздосадованный, герой Б. Китона вскакивает и со злостью пинает

дверь ногой. Дверь закрывается, привязанная к ней веревка натягивается и, неожиданно для героя, вырывает его зуб. Видеоклип прерывается в тот момент, когда герой Б. Китона прижимает руку ко рту, пытаясь понять, что случилось с его зубом; и зритель ожидает, что оба персонажа посмотрят на лежащий у двери зуб. *Задача:* основываясь на оценке поворота головы персонажа Б. Китона, определить объект его внимания.

Ситуация № 5 (телесериал «Мистер Бин»). Мистер Бин устанавливает новый телевизор. Он берет вилку от телевизора и втыкает ее в розетку, не замечая отсутствие провода, соединяющего вилку с телевизором. Затем персонаж пытается включить телевизор. Телевизор не включается. Персонаж стучит по телевизору. Видеоклип прерывается в тот момент, когда Мистер Бин поднимает голову; и зритель ожидает, что он увидит отсутствие провода у вилки. *Задача:* основываясь на оценке поворота головы Мистера Бина, определить объект его внимания.

Использованные в эксперименте видеофрагменты предъявлялись без звукового сопровождения и обладали следующими характеристиками:

(1) Содержание видеофрагментов и характеристики целевых стимулов исключали использование испытуемыми «восходящей» формы совместного внимания (*bottom-up joint attention*). В видеофрагментах отсутствовали явные признаки движения целевых объектов (будущих объектов внимания персонажей), могущие привлечь к ним непроизвольное внимание наблюдателей. Также в видеофрагментах отсутствовали пространственные подсказки, такие как повороты головы и указательные жесты персонажей, ориентирующие внимание наблюдателей в направлении целевых объектов.

(2) Видеофрагменты прерывались до начала поворота головы персонажа к объекту его интереса. Момент прерывания видеофрагментов всегда являлся неожиданным для испытуемых.

(3) В видеофрагментах № 1, № 2 и № 4 целевые объекты внимания персонажа были связаны с интенциями обоих участников и являлись потенциальными референтами их предполагаемого взаимодействия. В видеофрагментах № 3 и № 5 целевые объекты были связаны с интенциями центрального персонажа.

Предъявляемые в качестве целевых изображений (рисунок 1) статичные кадры сцен³ характеризовались следующими характеристиками:

(1) Кадры отсутствовали в видеофрагментах и изображали персонажа, завершившего поворот головы к целевому объекту и фиксирующего на нем взгляд. Угловое расстояние от глаз персонажа до целевого объекта его внимания варьировало от 6.2° до 16.5°. По сравнению с видеофрагментами целевые объекты на кадрах были изображены со смещенного ракурса (ситуации № 3 и 5) или имели другой вид (ситуации № 2 и 4).

(2) На всех кадрах целевые объекты внимания персонажей обладали маленьким размером (до 1.5°), низким уровнем «визуальной яркости» и были представлены в сложном окружении среди «ярких» объектов.

³ Под термином «сцена» здесь и далее подразумевается содержание отдельного кадра, предъявляемого в задаче поиска объекта внимания персонажа.

Выделение «визуально ярких» областей кадров проводилось с помощью инструментария «Saliency Toolbox» (Walther, Koch, 2006).

(3) На линии взгляда персонажей находился только один объект. Линия взгляда изображенных на кадрах персонажей рассчитывалась по признакам ориентации их позы, головы и глаз. Оценивалось отклонение саккад испытуемых относительно данной линии.

Результаты и их обсуждение

Были проанализированы вербальные ответы испытуемых при идентификации объектов внимания персонажей социальных сцен. Распределение ответов испытуемых для сцен № 1 и № 2 представлено в таблице 1.

Как видно из представленных данных, наличие или отсутствие информации о контексте коммуникативной ситуации оказывало существенное влияние на ответы испытуемых. В сцене № 1 48.7% испытуемых, не обладавших информацией о контексте, указали на «корзину», и лишь 8.1% — на «скидочную карту», находящуюся на линии взгляда персонажа. Эти лица демонстрировали большое разнообразие вербальных ответов, обозначая карту как «купюра», «что-то на столе» и т. д., в связи с чем их ответы группировались на основе общности референта. В отличие от них, 91.7% испытуемых, обладавших информацией о контексте, указали на «скидочную карту» и лишь 5.5% — на «корзину». Сходные результаты были получены по остальным сценам.

На рисунке 2 показано распределение фиксаций взгляда испытуемых при поиске объектов внимания персонажей социальных сцен.

Как видно из представленных данных, наличие информации о коммуникативном контексте оказывает существенное влияние на зрительный поиск объектов внимания наблюдаемых персонажей. Испытуемые, не просмотревшие видеофрагменты, совершали саккады в зоне взгляда персонажей, но испытывали выраженные затруднения в идентификации объектов их внимания, демонстрируя хаотичную и разнонаправленную поисковую активность и фиксируя взгляд преимущественно «визуально яркие» объекты. Напротив, лица, просмотревшие видеофрагменты, решали поставленную задачу путем реализации одной или двух точных саккад от лица персонажа к объекту его внимания. Они демонстрировали эффективный вид совместного внимания, предполагавший быстрое экстрафовеальное выделение объектов взгляда персонажей и реализацию к ним саккад, несмотря на малый размер, низкий уровень «визуальной яркости» этих объектов и наличие конкурирующего предметного окружения.

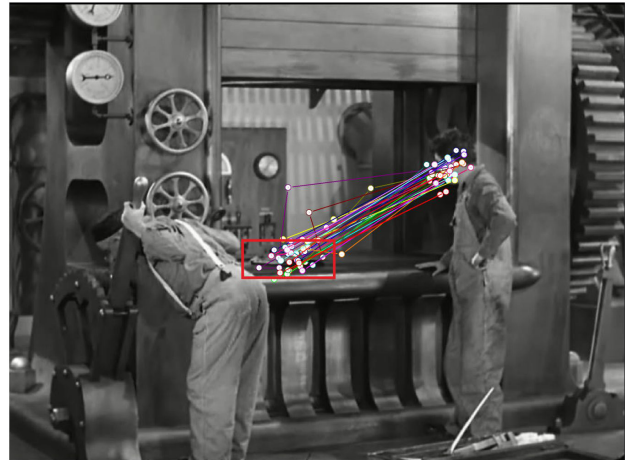
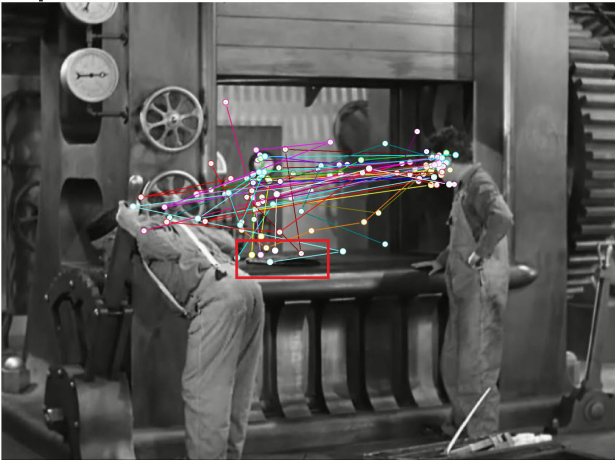
В таблице 2 представлены данные о количестве испытуемых разных групп, зафиксировавших взгляд на области целевого объекта (обозначенной красным прямоугольником на рисунке 2).

Для показателя количества зрительных фиксаций на области целевого объекта, суммированного по пяти сценам, проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с двумя межгрупповыми факторами — *Информация о контексте* (нет/есть) и *Время экспозиции подсказки* (200/750 мс). Выявлено достоверное влия-

сцена 1



сцена 2



сцена 3

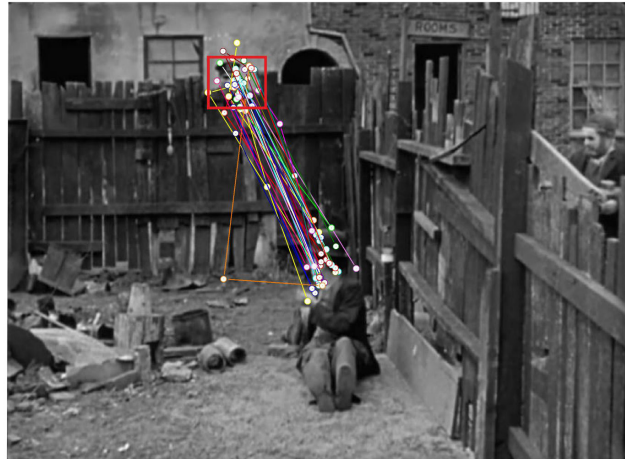


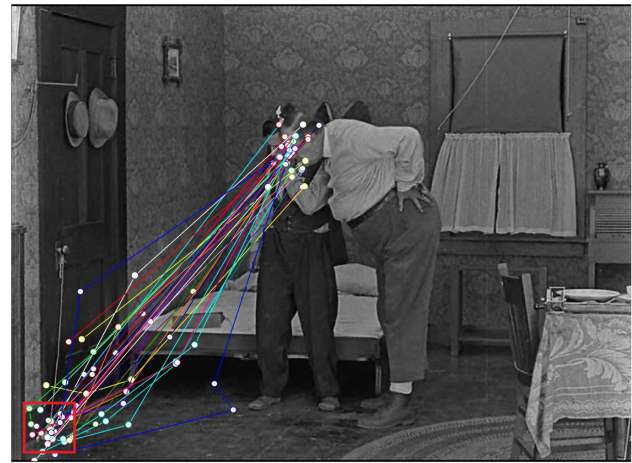
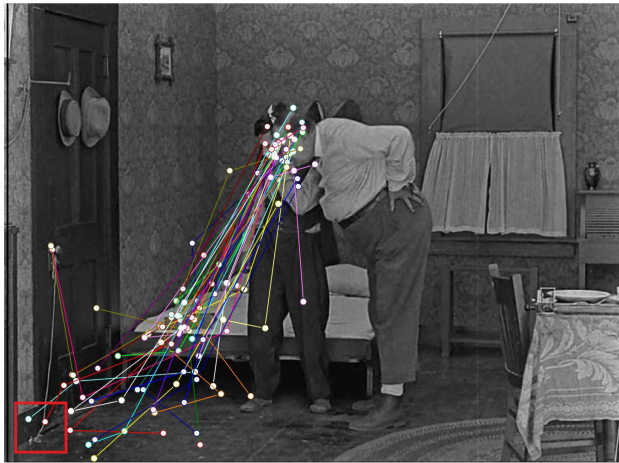
Рисунок 2. Распределение фиксаций взгляда в группах испытуемых, обладавших (справа) и не обладавших (слева) информацией о коммуникативном контексте, при детекции объектов внимания персонажей. Примечание. Красным прямоугольником обозначен целевой объект внимания персонажа, находящийся на линии его взгляда.

ние на данный показатель фактора *Информация о контексте* ($F(1, 70) = 439; p < .001, \eta^2 = .862$), в то время как влияние фактора *Время экспозиции подсказки* ($F(1, 70) = 0.05; p = .8, \eta^2 = .001$) и взаимодействия обоих факторов ($F(1, 70) = 2.2; p = .14, \eta^2 = .031$) оказалось не значимым.

Дальнейший анализ показал, что у лиц, обладавших информацией о контексте коммуникативной ситуации и сформировавших догадки относительно потенциальных объектов внимания персонажей, фактор *Номер*

сцены не оказывает значимого влияния на успешность саккадической детекции объекта внимания персонажа (Cochran's $Q = 1.8, p = .76$). Как видно из данных таблицы 2, в 82–95% случаев эти лица эффективно реализовали саккады к целевым объектам, независимо от структурных характеристик визуальной сцены (наличие «визуально ярких» дистракторов, размер и характеристики целевых объектов, их удаленность от глаз персонажа и т. д.) и степени доступности перцептивной информации об ориентации головы и глаз персонажа.

сцена 4



сцена 5

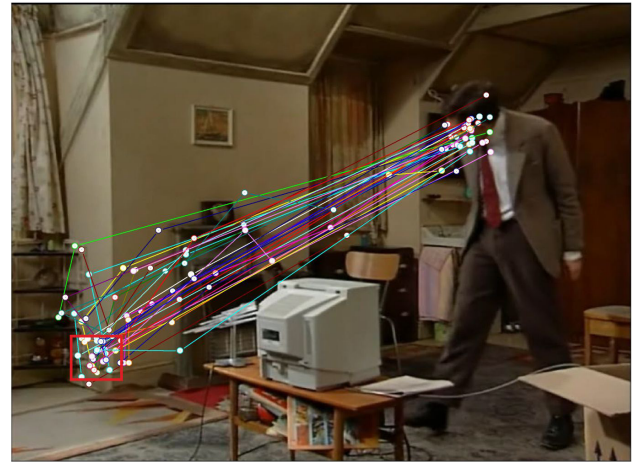
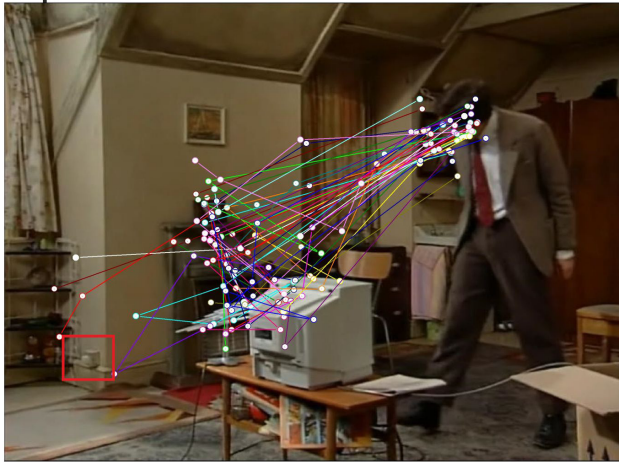


Рисунок 2. (продолжение)

У лиц, не обладавших информацией о коммуникативном контексте, фактор *Номер сцены* значимо влиял на успешность саккадической детекции целевых объектов (Cochran's $Q = 16.3$, $p = .003$). Данные таблицы 2 показывают, что эти испытуемые чаще находили взглядом целевой объект в сцене № 3 по сравнению с остальными сценами. Это объясняется тем, что в сцене № 3 в качестве объекта внимания персонажа выступало лицо человека, являющееся биологически значимым стимулом, обладающим свойством «заметности» (*saliency*) для испытуемых (например: Serf et al., 2009). Этот факт, а также данные рисунка 2 позволяют предположить, что у лиц, не просмотревших видеофрагменты и, таким образом, не имевших догадок о целевых объектах, совместное внимание направлялось преимущественно «заметными» стимулами, находящимися в зоне взгляда наблюдаемого персонажа. На рисунке 3 показано распределение зрительных фиксаций испытуемых, не просматривавших видеофрагменты, в сопоставлении с «визуально яркими» областями изображения, выделенными с помощью инструментария «Saliency Toolbox» (Walther, Koch, 2006).

Представленные данные показывают, что испытуемые чаще фиксируют внимание на находящихся в зоне взгляда наблюдаемого человека биологических объектах (лицо Мистера Бина в сцене № 1; лицо полицейского в сцене № 3), а также «визуально ярких» объектах

(прибор — в сцене № 2; часы — в сцене № 5), независимо от степени их близости к линии взгляда персонажа. Эти результаты согласуются с данными описанного выше эксперимента А. Боржи с соавт. (Borji et al., 2014) и свидетельствуют о том, что *механизм экстраполяции линии взгляда*, постулируемый Дж. Баттеруортом и другими авторами, не работает в коммуникативных ситуациях. Как правило, люди не выполняют детализированный анализ признаков ориентации головы и глаз другого человека с целью мысленного «вычерчивания» линии его взгляда и определения расположенного на конце этой линии объекта внимания. Подобный анализ требует значительных ресурсов фокальной обработки и временных затрат, в связи с чем является неэффективным (он также оказался неэффективным в робототехнике, например, Yucel et al., 2013). Вместо этого люди осуществляют быструю приблизительную оценку ориентации головы и глаз наблюдаемого человека, позволяющую выделить зону его взгляда, а затем идентифицируют попадающие в эту зону «визуально яркие» и биологически значимые объекты.

Можно предположить, что, в зависимости от доступности признаков ориентации головы и глаз наблюдаемого человека, ширина выделяемой зоны взгляда (угол вершины конуса) будет различной. Для проверки этого предположения у лиц, не обладавших информацией о коммуникативном контексте, проанализирован показатель отклонения первых саккад от линии



Рисунок 3. Распределение фиксаций взгляда испытуемых, не обладавших информацией о коммуникативном контексте, при детекции объектов внимания персонажей. Примечание 1. Желтым цветом обозначены «визуально яркие» области, находящиеся в зоне взгляда персонажа. Примечание 2. Зеленые метки обозначают фиксации испытуемых, для которых время экспозиции подсказки составляло 200 мс, красные — фиксации испытуемых, для которых время экспозиции подсказки составляло 750 мс.

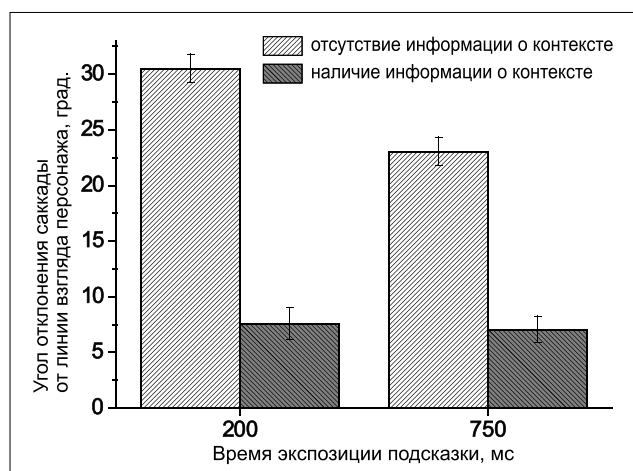
взгляда персонажа, для которого был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с межгрупповым фактором *Время экспозиции подсказки* (200/750 мс) и внутригрупповым фактором *Номер сцены* (сцены 1, 2, 3, 4, 5). Выявлено достоверное влияние на данный показатель как фактора *Время экспозиции подсказки* ($F(1,34)=17.2$; $p<.001$, $\eta^2=.336$), так и фактора *Номер сцены* ($F(4,31)=88.3$; $p<.001$, $\eta^2=.919$), в то время как их взаимодействие оказалось не значимым ($F(4,31)=1.8$; $p=.14$, $\eta^2=.194$). Лица, которым пре-

доставлялось меньшее время для оценки признаков ориентации головы и глаз персонажа, обнаруживали большее отклонение первых саккад от линии взгляда наблюдаемого человека по сравнению с испытуемыми, которым предоставлялось большее время для оценки данных признаков. Это свидетельствует, что возрастные доступности информации о признаках ориентации головы и глаз наблюдаемого персонажа приводит к сужению выделяемой зоны взгляда, в которой осуществляется поиск объектов его внимания.

Сцена № 1			Сцена № 2		
Вид ответа	Доля испытуемых, давших ответ, %		Вид ответа	Доля испытуемых, давших ответ, %	
	Отсутствие информации о контексте (N = 36)	Наличие информации о контексте (N = 38)		Отсутствие информации о контексте (N = 36)	Наличие информации о контексте (N = 38)
«скидочная карта»	8.1	91.7	«пиджак» или «предмет под прессом»	0	94.4
«корзина»	48.7	5.5	«что-то на столе»	7.9	2.8
«руки соседа»	21.6	0	«прибор на стене»	42.1	0
«карман соседа»	5.4	0	«что-то за окном» или «за стойкой»	18.5	0
«сосед»	5.4	2.8	«не знаю»	15.8	0
«не знаю»	10.8	0	другие ответы	15.7	2.8

Таблица 1. Распределение ответов испытуемых при идентификации объектов внимания персонажей сцен № 1 и № 2.

Номер сцены	Доля испытуемых, % (Количество человек)			
	Отсутствие информации о контексте		Наличие информации о контексте	
	Время экспозиции подсказки		Время экспозиции подсказки	
	200 мс (N = 18)	750 мс (N = 18)	200 мс (N = 21)	750 мс (N = 17)
1	5.5 (1)	0 (0)	85.7 (18)	82.4 (14)
2	16.6 (3)	22.2 (4)	95.2 (20)	88.2 (15)
3	22.2 (4)	38.9 (7)	95.2 (20)	82.4 (14)
4	5.5 (1)	11.1 (2)	85.7 (18)	82.4 (14)
5	5.5 (1)	5.5 (1)	85.7 (18)	82.4 (14)

Таблица 2. Количество испытуемых разных групп, зафиксировавших взгляд на объекте внимания персонажа.**Рисунок 4.** Влияние информации о коммуникативном контексте и времени экспозиции подсказки на отклонение первой саккады от линии взгляда персонажа. Примечание. Приведены значения среднего и стандартной ошибки среднего для анализируемых показателей.

Для фактора *Номер сцены* проведено попарное сравнение средних, которое показало, что в сценах № 1, № 2 и № 3, где «визуально яркие» дистракторы находятся на значительном отдалении от линии взгляда персонажа, испытуемые обнаруживают достоверно боль-

ший угол отклонения саккад, чем в сценах № 4 и № 5, где дистракторы находятся на небольшом отдалении от линии взгляда.

Показатель отклонения саккад от линии взгляда персонажа также был проанализирован у лиц, просмотревших видеофрагменты. Дисперсионный анализ не выявил значимого влияния на данный показатель факторов *Время экспозиции подсказки* ($F(1, 36) = 1.0$; $p = .3$, $\eta^2 = .028$) и *Номер сцены* ($F(4, 33) = 0.8$; $p = .5$, $\eta^2 = .090$) (рисунок 4).

Выявленные факты отсутствия влияния структурных характеристик сцены и времени экспозиции подсказки на саккадические реакции испытуемых, просмотревших видеофрагменты социальных ситуаций, согласуются с данными на рисунке 2 и свидетельствуют о том, что совместное внимание данных лиц детерминруется преимущественно нисходящими (*top-down*) факторами, в то время как восходящие (*bottom-up*) факторы и доступность информации о направлении взгляда персонажа не играют существенной роли.

У испытуемых, просмотревших видеофрагменты ситуаций, также было проанализировано время зрительного поиска целевого объекта внимания персонажа, то есть промежуток времени от момента предъявления кадра сцены до первой фиксации на целевом объекте. Дисперсионный анализ не выявил значимого влияния на этот показатель фактора *Время экспозиции*

подсказки ($F(1, 36) = 0.2$; $p = .6$, $\eta^2 = .005$), но показал достоверное влияние фактора *Номер сцены* ($F(4, 33) = 18.7$; $p < .001$, $\eta^2 = .694$). Взаимодействие этих факторов оказалось не значимым ($F(4, 33) = 1.8$; $p = .13$, $\eta^2 = .186$). Проведенный для фактора *Номер сцены* анализ попарных сравнений показал, что у лиц, просмотревших видеофрагменты, время поиска объекта внимания персонажа определялось исключительно удаленностью данного объекта от головы и глаз изображенного человека (то есть исходной точки, от которой испытуемые начинали зрительный поиск). Оно являлось небольшим для сцен № 2 и № 3, где угловое расстояние от глаз персонажа до целевого объекта составляло 6.2° и 7.5° (соответственно, 0.47 ± 0.17 с. и 0.53 ± 0.23 с.) и достоверно большим для сцен № 1, № 4 и № 5, где данное расстояние составляло 14.5° , 14.6° и 16.5° (соответственно, 0.67 ± 0.17 с., 0.74 ± 0.18 с. и 0.78 ± 0.23 с.). Другими словами, у лиц, обладавших информацией о коммуникативном контексте, время поиска объектов внимания персонажей не зависело от визуальных характеристик этих объектов и структурных особенностей сцены (цветовая гамма, компоновка сцены, наличие и расположение «визуально ярких» дистракторов и т.д.) и определялось исключительно расстоянием, на которое испытуемым было необходимо переместить свой взгляд.

При объяснении вышеописанных фактов необходимо учесть три обстоятельства. Во-первых, как отмечалось ранее, испытуемые осуществляли поиск объектов внимания персонажей в ранее не виденных ими кадрах сцен. В предъявленных им видеофрагментах эти объекты были изображены со смещенного ракурса или имели другой вид. Во-вторых, видеофрагменты всегда прерывались неожиданно для испытуемых, и они не могли заранее предугадать, какие именно объекты внимания персонажей им предстоит искать. В-третьих, в видеофрагментах отсутствовали пространственные подсказки, такие как повороты головы и указательные жесты, ориентирующие внимание испытуемых в направлении будущих объектов внимания персонажей. Возникает вопрос: каким образом испытуемым, просмотревшим видеофрагменты, удавалось осуществлять столь точную саккадическую детекцию объектов внимания персонажей в ранее не виденных кадрах сцены в условиях визуальной «малозаметности» (*non-saliency*) и малого размера этих объектов, а также присутствия конкурирующих «ярких» дистракторов?

Согласно данным исследований (например, Malcolm, Henderson, 2009), столь эффективный зрительный поиск мог основываться только на предварительно известной информации о характеристиках целевых объектов. С учетом факта, что испытуемые заранее не знали, какие объекты им предстоит искать, можно сделать вывод о том, что при восприятии социальной ситуации они избирательно запоминали информацию о характеристиках тех стимулов, которые рассматривались как объекты будущего внимания персонажей и/или референты их предполагаемого коммуникативного взаимодействия. Однако каким образом осуществлялось выделение этих стимулов?

Для выделения будущих объектов внимания персонажей было недостаточно знаний о ситуации и понимания намерений ее участников. Необходимо было

рассмотрение ситуации одновременно с нескольких точек зрения. Например, чтобы определить будущий объект внимания покупателя в сцене № 1 (см. выше), наблюдатель должен был предварительно не только распознать его намерение взять карту, но и спрогнозировать ошибку персонажа, вследствие которой он принял чужую карту за свою. Для этого требовалось сопоставить точку зрения покупателя с информацией, доступной с позиции наблюдателя (мужчина не заметил, как положил сумку на свою карту). Чтобы определить будущий объект внимания Маленького бродяги в сцене № 2, наблюдатель должен был предварительно заметить его ошибку, когда бродяга оставил пиджак под прессом. Это также достигалось сопоставлением точки зрения персонажа с информацией, доступной с позиции наблюдателя. Чтобы определить будущий объект внимания персонажа в сцене № 3, наблюдатель также должен был реконструировать его точку зрения и сопоставить с информацией, доступной с внешней позиции (бродяга не заметил полицейского, когда воровал сосиску). Итак, успешная идентификация объектов внимания участников коммуникативных ситуаций требовала реконструкции точек зрения персонажей и сопоставления их с информацией, доступной с внешней позиции.

Можно предположить, что при восприятии видеофрагментов процессы концептуализации социальной ситуации, реконструкции и сопоставления точек зрения ее участников осуществлялись испытуемыми очень быстро, в режиме реального времени. По результатам такого анализа выделялись потенциальные объекты внимания и/или референты коммуникативного взаимодействия участников, информация о характеристиках которых направлялась в рабочую память наблюдателя и в дальнейшем оказывала нисходящее влияние на зрительный поиск объектов взгляда персонажей в кадрах сцен.

Существующие в настоящее время экспериментальные данные свидетельствуют о наличии двух видов нисходящей (*top-down*) информации, позволяющих осуществлять эффективный зрительный поиск «малозаметных» объектов в реалистичном окружении. Во-первых, это информация о визуальных признаках цели (*target template information*). Во-вторых, это информация о локализации цели в структуре визуальной сцены (*scene context information*) (Malcolm, Henderson, 2010). Какой из этих видов информации преимущественно используется при поиске объектов внимания персонажей социальных ситуаций? Для ответа на этот вопрос был проведен второй эксперимент.

Эксперимент 2

Испытуемые

В эксперименте приняли участие 35 здоровых испытуемых обоего пола в возрасте от 18 до 32 лет, которые были разделены на первую ($N = 15$), вторую ($N = 10$) и третью ($N = 10$) экспериментальные группы.

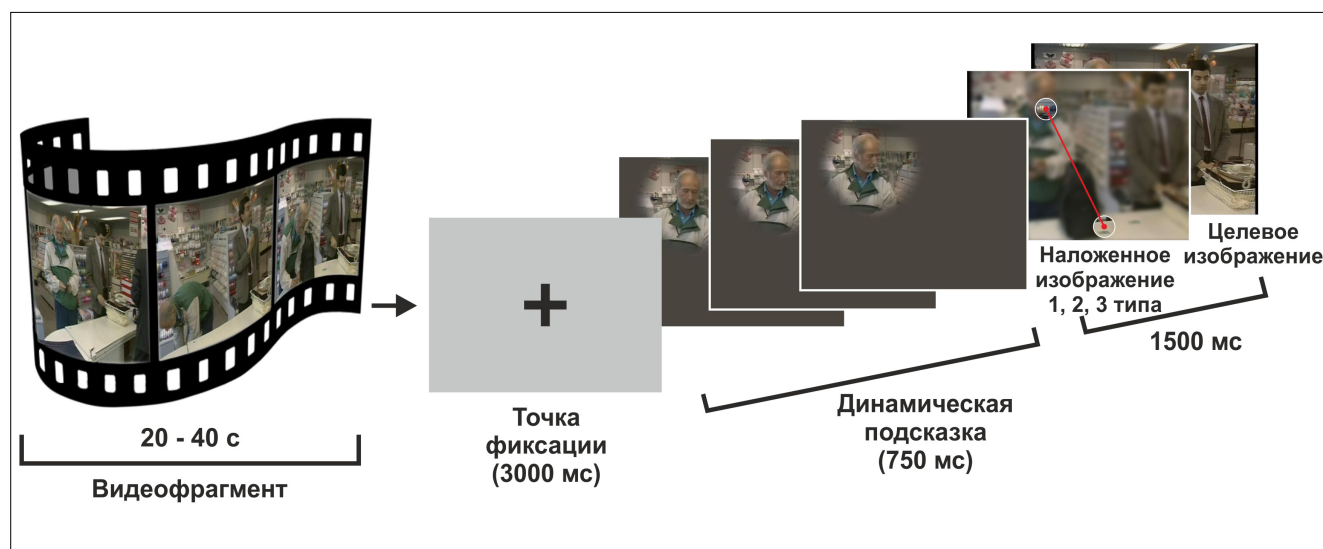


Рисунок 5. Задача саккадической детекции объекта внимания персонажа в условиях периферически воспринимаемых дистракторов.

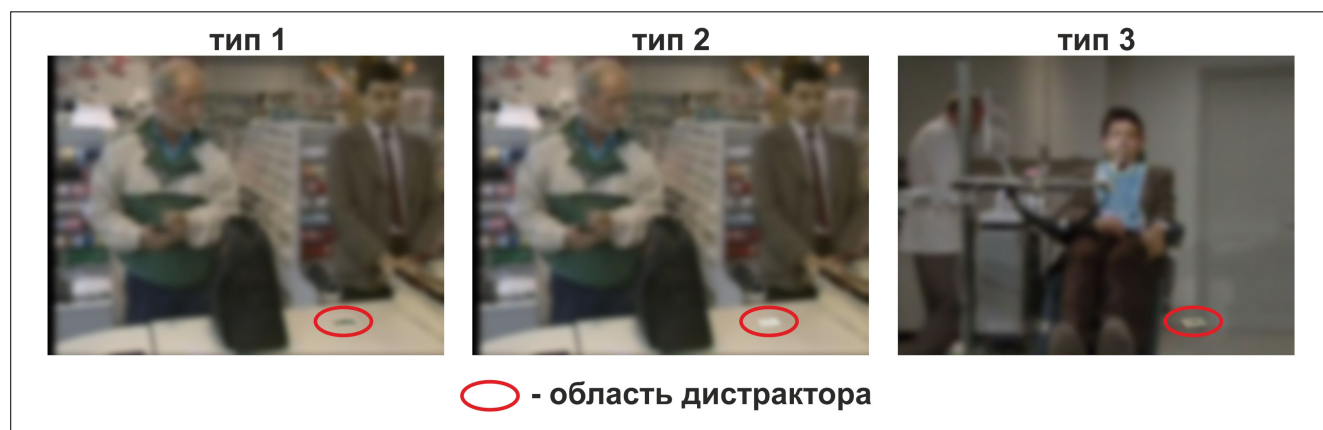


Рисунок 6. Примеры типов дистракторов.

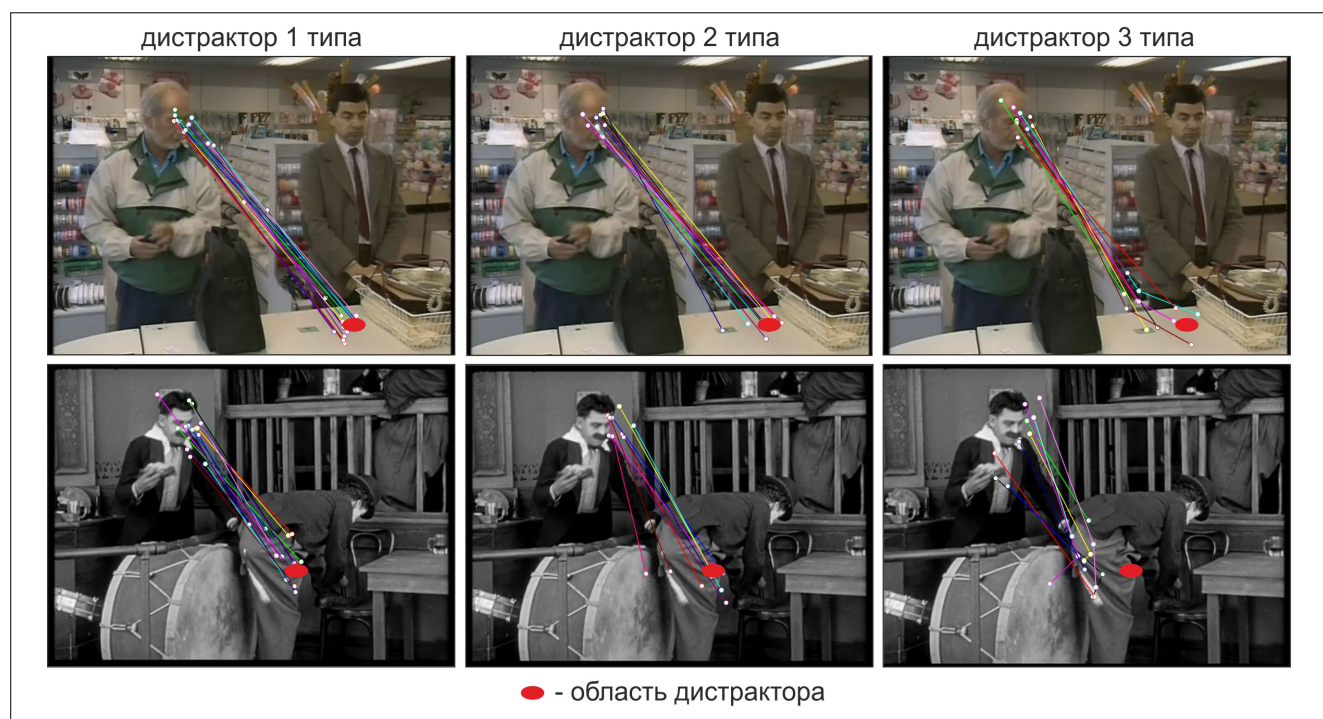


Рисунок 7. Распределение фиксаций взгляда при поиске объектов внимания персонажей в трех группах испытуемых.

Дизайн и процедура эксперимента

Использовался методический подход, основанный на изменении предъявляемой зрительной информации в зависимости от регистрируемой в реальном времени фиксации взора испытуемого (*gaze-contingent paradigm*). Применялась процедура «движущегося окна» (*moving window paradigm*), предполагающая, что только часть изображения в пределах фиксации взора предъявляется нормальным образом («окно ясного видения»), в то время как остальные части изображения (периферическая информация) скрыты от испытуемого или предъявляются в искаженном виде.

Разработанная нами ранее модификация этой процедуры состояла в следующем. Испытуемому предъявляются два наложенных друг на друга изображения: верхнее A1 и нижнее A2. В области фиксации взгляда испытуемого, регистрируемой и распознаваемой в режиме реального времени, возникает окно, диаметр которого составляет 2°. Данное окно представляет собой «дырку» в верхнем изображении A1, через которую виден фрагмент расположенного под ним изображения A2. Другими словами, в фокальной области испытуемому предъявляется фрагмент A2, в периферической области — изображение A1. Когда испытуемый совершает саккаду и фиксирует взгляд на новом участке изображения A1, эта фиксация распознается в течение 15–20 мс, и на данном участке появляется новая «дырка», через которую виден уже другой фрагмент изображения A2. Варьирование разных типов дистракторов на изображении A1 позволяет исследовать нисходящее влияние информации в зрительной памяти на выбор саккадических целей. В типичной задаче испытуемому предлагается быстро переместить взгляд (и движущееся вместе с ним окно) к запомненной ранее области локализации целевого стимула, игнорируя дистракторы на изображении A1. За счет фокальной обработки видимой в окне информации (виден/не виден целевой стимул) он получает прямую обратную связь об успешности выполнения задания (Зотов, Андрианова, 2014). Экспериментальная процедура, использованная в настоящем исследовании, представлена на рисунке 5.

Как и в первом исследовании, испытуемым предлагалась задача поиска объекта внимания персонажа. Непосредственно перед выполнением данной задачи все испытуемые просматривали идентичные видеофрагменты, позволяющие сформировать представление о контексте коммуникативной ситуации. Задача начиналась с фиксации взгляда в центре экрана, после чего испытуемому предъявлялась «подсказка» — динамическое изображение головы персонажа, поворачивающейся в ту или иную сторону. Затем появлялось «размытое» (с помощью низкочастотного фильтра) изображение A1, под которым находилось целевое изображение A2. На изображении A1 присутствовал дистрактор, сходный с целевым объектом, но смещенный относительно него на 9–11°. На месте фиксации взгляда испытуемого возникало окно диаметром 2°, через которое он видел фрагмент изображения A2. Задача испытуемого состояла в том, чтобы как можно быстрее перевести взгляд к запомненному ранее местоположению объекта внимания персонажа, игнорируя дис-

трактор на изображении A1. Всем испытуемым говорилось, что расположение дистрактора в 100% случаев *не соответствует* расположению целевого объекта, поэтому они не должны фиксировать на нем взгляд.

Использовались три типа наложенных изображений: 1 *тип* — изображение дистрактора, идентичного целевому объекту по визуальным признакам, в контексте той же сцены; 2 *тип* — изображение дистрактора, отличающегося от целевого объекта по цветовым характеристикам, в контексте той же сцены; 3 *тип* — изображение дистрактора, идентичного целевому объекту по визуальным признакам, в контексте другой сцены (рисунок 6). Три группы испытуемых выполняли одинаковые задачи с разными типами наложенных изображений A1.

Оборудование и стимульный материал

Оборудование, условия обследования испытуемых и алгоритмы анализа данных движений глаз были такими же, что и в предыдущем эксперименте. В качестве стимульного материала использовались кадры и видеофрагменты двух социальных ситуаций, первая из которых была идентичной ситуации №1 первого эксперимента, вторая представляла собой социальную ситуацию из художественного фильма «Собачья жизнь» (США, 1918).

Результаты и их обсуждение

Несмотря на эксплицитное знание о нерелевантности дистракторов, ошибочные фиксации на них в среднем обнаружили 93% испытуемых, которым предъявлялись наложенные изображения типа 1, 81% испытуемых, которым предъявлялись наложенные изображения типа 2, и 15% испытуемых, которым предъявлялись наложенные изображения типа 3. На рисунке 7 показано распределение фиксаций взгляда при детекции объектов внимания персонажей в разных группах испытуемых.

Как видно из рисунка 7, дистракторы типа 1, идентичные целевым объектам по визуальным признакам и предъявленные в том же контексте, вызывают наибольшее количество ошибочных фиксаций испытуемых. Дистракторы типа 3, предъявленные в контексте другой сцены, вызывают наименьшее количество ошибочных фиксаций. Видно, что во второй сцене дистрактор типа 1 вызывает значительное количество ошибочных фиксаций, несмотря на то, что он находится на значительном отдалении от линии взгляда участника сцены. Это показывает, что при детекции объекта внимания персонажа испытуемые в большей степени опираются на признаки экстрафовеально воспринимаемых стимулов и их соответствие удерживаемой в памяти информации, чем на анализ положения головы человека, позволяющий экстраполировать линию его взгляда.

По данным субъективных отчетов, все испытуемые, которым предъявлялись дистракторы типа 3, мгновенно распознавали изменение визуального контекста сцены (*gist of scene*), что соответствует данным зарубежных исследований (Oliva, Torralba, 2005). На нескольких испытуемых неожиданное изменение контекста оказало дезорганизующий эффект: они ре-

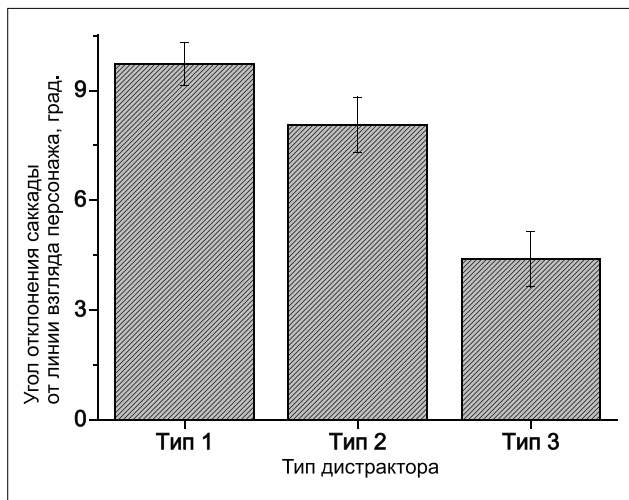


Рисунок 8. Влияние типа дистрактора на отклонение первой саккады от линии взгляда персонажа. Примечание. Приведены значения среднего и стандартной ошибки среднего для анализируемых показателей.

ализовали саккады к лицам персонажей новой сцены, забыв о задаче детекции целевого объекта. Данные этих испытуемых были исключены из анализа.

Для показателя отклонения первых саккад от линии взгляда персонажа был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с одним межгрупповым фактором *Тип дистрактора* (тип 1, 2, 3) и одним внутригрупповым фактором *Номер сцены* (сцены 1 и 2). Выявлено достоверное влияние на данный показатель фактора *Тип дистрактора* ($F(2, 32) = 18.4; p < .001, \eta^2 = .535$), в то время как влияние фактора *Номер сцены* оказалось статистически не значимым ($F(1, 32) = 2.1; p = .1, \eta^2 = .062$) (рисунок 7). Анализ парных сравнений показал, что показатель отклонения саккад значимо не различается у лиц, которым предъявлялись дистракторы типов 1 и 2 ($p = .24$), но имеет достоверно меньшие значения ($p < .001$) у лиц, которым предъявлялись дистракторы типа 3 (рисунок 8).

Результаты настоящего эксперимента показывают, что при восприятии невербальных коммуникативных сцен наблюдатели выделяют потенциальные объекты внимания персонажей и поддерживают в рабочей памяти информацию об их визуальных признаках и относительной локализации в пространстве сцены. Экстрафовеальные стимулы, в наибольшей степени соответствующие этой информации, «захватывают» внимание испытуемых и выбираются в качестве саккадических целей, несмотря на эксплицитное знание об их нерелевантности.

Общее обсуждение результатов

Процессы совместного внимания связывают преимущественно со способностью человека проследивать взором направление взора собеседника (*gaze following*) (например, Emery, 2000). Многие работы опираются на концепцию Дж. Баттеруорта, постулирующую, что идентификация объекта внимания другого человека основывается на визуальной оценке ориентации его головы и глаз, позволяющей экстраполировать линию его взгляда (Butterworth, Jarrett, 1991).

Между тем ориентация головы и глаз другого индивида является недостаточным источником информации об объекте его внимания. По направлению взгляда человека невозможно определить, на какой объект из множества расположенных рядом или на какие аспекты объекта он направил свое внимание.

Анализ литературных данных позволил выделить три вида информации, на которых основывается идентификация объектов зрительного внимания другого человека. Наряду с данными об ориентации головы и глаз, это низкоуровневая информация о присутствующих в сцене визуально «заметных» объектах и высокоуровневая информация о потенциальных объектах внимания наблюдаемого человека, «вычисляемая» на основе реконструкции его точки зрения. Цель настоящей работы состояла в анализе взаимодействия этих видов информации при идентификации объектов внимания участников невербальных коммуникативных сцен. Результаты проведенных экспериментов позволили сделать ряд выводов, касающихся механизмов как «восходящего», так и «нисходящего» совместного внимания.

«Восходящее» совместное внимание

Исследование показало, что лица, не обладающие информацией о контексте коммуникативной ситуации, демонстрируют совместное внимание, ведомое как информацией о признаках ориентации головы и глаз человека, так и «восходящей» (*bottom-up*) информацией о «визуально ярких» или биологически значимых объектах, попадающих в зону взгляда наблюдаемого персонажа и привлекающих непроизвольное внимание наблюдателя.

Результаты настоящего исследования оказались сходными с данными эксперимента А. Боржи с соавт. (Borji et al., 2014), показавшими, что визуально «яркие» элементы (*saliency map*), находящиеся в зоне взгляда (*gaze map*) изображенного человека, в первую очередь привлекают внимание испытуемых при свободном рассматривании фотографических изображений. Если в эксперименте А. Боржи перед испытуемыми не ставилось специальной задачи поиска объекта внимания изображенного человека, то в нашем исследовании такая задача ставилась. Следовательно, можно было ожидать, что наши испытуемые будут более точны в прослеживании линии взгляда персонажа и идентификации расположенного на конце этой линии объекта. Однако это ожидание не подтвердилось. Как и испытуемые А. Боржи, наши испытуемые проводили быструю автоматизированную оценку ориентации головы и глаз наблюдаемого человека, позволяющую выделить относительно широкую ($\pm 15^\circ$) зону его взгляда, а затем фиксировали внимание на находящихся в этой зоне «визуально ярких» или биологически значимых объектах. Большая доступность информации об ориентации головы и глаз персонажа приводила к уменьшению зоны, в которой выбирался объект внимания.

Необходимо отметить, что продемонстрированная нашими испытуемыми стратегия совместного внимания является гораздо более эффективной по сравнению со стратегией экстраполяции линии взгляда, постулируемой Дж. Баттеруортом и другими авторами

(Butterworth, Jarrett, 1991; Bock et al., 2008). Последняя предполагает, что индивид осуществляет детализированный анализ признаков ориентации головы и глаз наблюдаемого человека, на основе которого мысленно выстраивает линию его взгляда и идентифицирует расположенный на данной линии объект. Такая стратегия совместного внимания требует значительного времени и ресурсов фокальной обработки и, в связи с этим, является неэффективной в динамических коммуникативных ситуациях.

«Нисходящее» совместное внимание

Исследование показало, что совместное внимание лиц, обладающих информацией о коммуникативном контексте, направляется преимущественно «нисходящей» (*top-down*) информацией о потенциальных референтах коммуникации, в то время как «восходящая» (*bottom-up*) информация о «визуально ярких» объектах сцены и степень доступности признаков ориентации головы и глаз наблюдаемого человека не играют какой-либо существенной роли. В проведенном эксперименте испытуемые, сформировавшие представление о потенциальных объектах внимания участников коммуникации, продемонстрировали способность к практически мгновенному поиску таких объектов в пространстве зрительной сцены. Данная способность не зависела от перцептивных характеристик этих объектов (размер и уровень «визуальной яркости»), характеристик сцены (цветовая гамма, компоновка сцены, наличие и расположение «визуально ярких» дистракторов и т.д.), а также степени доступности информации об ориентации головы и глаз наблюдаемых персонажей.

Полученные результаты свидетельствуют о несостоятельности концепций, сводящих совместное внимание к элементарному и «рефлекторному» процессу отслеживания направления взгляда человека по ориентации его головы и глаз, и подтверждают выводы М. Томаселло и его коллег о ключевой роли «нисходящих» факторов в процессах совместного внимания человека (Томаселло, 2011; Moll et al., 2006).

Результаты исследования показывают, что при восприятии невербальных коммуникативных ситуаций наблюдатель быстро, в режиме реального времени, осуществляет концептуализацию наблюдаемых событий, реконструкцию и сопоставление точек зрения участников коммуникации. По результатам такого анализа выделяются потенциальные объекты внимания и/или референты коммуникативного взаимодействия участников, информацию о которых наблюдатель избирательно запоминает и поддерживает в рабочей памяти. В дальнейшем это позволяет ему легко идентифицировать референты взглядов, указательных жестов и дейктических высказываний наблюдаемых людей, а также осуществлять практически мгновенный поиск этих объектов/референтов в пространстве сцены.

Предложенный в настоящей работе экспериментальный подход может оказаться перспективным для изучения высокоуровневых механизмов зрительного внимания человека в целом. В большинстве исследований, посвященных роли «нисходящих» (*top-down*) факторов в процессах зрительного поиска, перед выполнением поисковой задачи испытуемым в той

или иной форме предъявляется информация о целевом стимуле, который необходимо найти (например, Malcolm, Henderson, 2010). Между тем в повседневной жизни человек самостоятельно генерирует репрезентации целевых объектов поиска. Данное явление наиболее ярко представлено в ситуации просмотра кинофильма, когда наблюдатель ежесекундно обновляет репрезентации целевых объектов в памяти, каждый раз осуществляя поиск новых объектов в просматриваемых кадрах фильма. Какую информацию включают генерируемые наблюдателем репрезентации целевых объектов поиска? Требуется ли формирование таких репрезентаций предварительной фокальной обработки целевого объекта? Каким образом происходит обновление (*updating*) репрезентаций целевых объектов в зрительной рабочей памяти наблюдателя? Пока эти вопросы остаются вне поля зрения исследователей. Результаты настоящей работы позволяют предположить, что такие репрезентации включают как информацию о низкоуровневых признаках целевых объектов (цвет, ориентация, размер), так и сведения об их относительной локализации в пространстве сцены, однако это предположение нуждается в дальнейшей экспериментальной проверке.

Роль реконструкции перспективы другого человека в процессах совместного внимания

Настоящая работа показала, что понимание контекста коммуникативной ситуации, определяющее успешность идентификации объектов внимания другого человека, предполагает создание и сопоставление разных точек зрения или перспектив. Этот вывод соответствует так называемой *теории кругозора и окружения*, разработанной выдающимся отечественным мыслителем М.М. Бахтиным еще в 20-х гг. прошлого века (Бахтин, 1979; 2010). По мнению М.М. Бахтина, жест, взгляд другого человека или, например, высказывание «так», взятые сами по себе, изолированно, не несут существенной информации и обретают значение лишь при соотношении их с «внесловесным контекстом» коммуникативной ситуации. Этот «внесловесный контекст» складывается из трех компонентов: (1) общий для собеседников пространственный кругозор («вместе видимое»); (2) общие знания («вместе известное»); (3) согласующиеся концептуализации ситуации («согласно оцененное») (Бахтин, 2010, с. 152). Наблюдатель способен определить референты взглядов, жестов и высказываний лишь тогда, когда он «приобщится» к «общему пространственному и смысловому кругозору» участников коммуникации, то есть сконструирует и сопоставит их точки зрения на происходящее (там же). В качестве примера М.М. Бахтин приводит игру в разбойников: «Мальчик, играющий атамана разбойников, изнутри переживает свою жизнь разбойника, глазами разбойника смотрит на пробегающего мимо другого мальчика, его кругозор есть кругозор изображаемого им разбойника; то же самое имеет место и для его сотоварищей по игре» (Бахтин, 1979, с. 67). Жесты, взгляды и высказывания играющих детей зритель может понять лишь тогда, когда разделит с ними знание о разыгрываемом событии (нападение разбойников) и приобщится к их концептуальному ви-

дению внешнего окружения (палка — меч, столбы — солдаты). Одновременно зритель учитывает аспекты окружения, недоступные сознанию участников в данный момент времени, но релевантные их предполагаемым намерениям (автор обозначает это как принципиальный *избыток* видения зрителя по отношению к видению ситуации героем). Другими словами, происходит постоянное сопоставление («диалог») между тем, что видит/знает зритель, и тем, что, как он думает, видит/знает наблюдаемый персонаж. М. М. Бахтин пишет: «Близкой к действительной позиции зрителя представляется нам наивная установка того простолудина, который предупреждал героя пьесы о сделанной против него засаде и готов был броситься ему на помощь во время сделанного на него нападения. Такой установкой наивный зритель занимал устойчивую позицию вне героя, учитывал трансгredientные сознанию самого героя моменты» (там же, с. 71).

Вышеописанные положения теории М. М. Бахтина получили подтверждение в исследованиях последних лет, посвященных проблемам социального познания. В работах М. Томаселло было показано, что полиперспективные или диалогичные когнитивные репрезентации (*perspectival or dialogic cognitive representations*) являются уникальными для человеческого вида и играют фундаментальную роль в развитии коммуникативных компетенций в детском возрасте (Томаселло, 2011). В когнитивно-лингвистических исследованиях последних лет было продемонстрировано, что способность человека конструировать и сопоставлять несколько точек зрения (*viewpoints*) на объекты или события имеет ключевое значение для понимания различных видов коммуникативных сигналов (Sweetser, 2012).

Настоящее исследование показало, что такая способность также играет ключевую роль в обеспечении процессов «нисходящего» совместного внимания человека. С позиции теории концептуальной интеграции Ж. Фоконье и М. Тернера (Fauconnier, Turner, 2002), можно говорить о том, что при восприятии коммуникативной ситуации наблюдатель в реальном времени конструирует ментальные пространства, соответствующие точкам зрения каждого из участников («он видит/думает, что...»). Сопоставление (*blending*) этих пространств позволяет выделять потенциальные объекты общего внимания участников, которые могут составлять основу (*common ground*) их будущего коммуникативного взаимодействия. Поддержание в рабочей памяти визуально-пространственных характеристик этих объектов обеспечивает высокую эффективность процессов зрительного внимания наблюдателя при восприятии динамических коммуникативных сцен.

Необходимо отметить, что использованные в настоящей работе социальные ситуации обладают существенным сходством с ситуациями, моделируемыми в задачах на понимание ошибочных убеждений другого человека (*false-belief task*) в рамках подхода, посвященного изучению так называемой «теории психического» (*theory of mind*), которая обычно обозначается аббревиатурой *ToM*. В типичной задаче «Салли-Энн» (*Sally-Anne test*) имеются два персонажа: Салли и Энн. У Салли есть корзинка, а у Энн — коробочка. Салли кладет

в корзинку шарик (конфетку и т.п.) и выходит. Энн перекладывает шарик в коробку. Ребенка спрашивают: «Когда вернется Салли, куда она посмотрит? Где она будет искать шарик?» Чтобы предсказать объект внимания Салли, ребенок должен определить ее ошибочное убеждение о местонахождении шарика (Baron-Cohen et al., 1985; Кармилофф-Смит и др., 2012). Сходным образом в нашем исследовании для того, чтобы предсказать объект внимания персонажа ситуации № 1, испытуемый должен определить его ошибочное убеждение о местонахождении «скидочной карты» (см. приведенное выше обсуждение роли выявления ошибок персонажей в прогнозировании объектов их внимания).

Успешное выполнение индивидом задачи на понимание ошибочных убеждений традиционно интерпретируется как свидетельство наличия *ToM*, то есть понимания индивидом того, что другой человек обладает знаниями, убеждениями, намерениями, эмоциями и т.д., отличающимися от его собственных (Baron-Cohen et al., 1985; Сергиенко, 2005; Кармилофф-Смит и др., 2012). Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что успешная реализация «нисходящего» совместного внимания в коммуникативных ситуациях требует наличия *ToM*.

В то же время можно согласиться с мнением Е. А. Сергиенко и других авторов о том, что для успешной идентификации ложных убеждений другого человека, необходимой для прогнозирования его поведения (в т.ч. возможных объектов его внимания), недостаточно знания индивида о том, что другой человек обладает убеждениями, намерениями, желаниями и т.д., отличающимися от его собственных. Необходима способность сопоставить точку зрения другого человека со своей собственной позицией или перспективой (Сергиенко, 2005; Sweetser, 2012). Таким образом, с вопроса о том, есть ли у тех или иных контингентов людей (младенцев, больных аутизмом, шизофренией и т.д.) способность к построению *ToM* другого человека, исследовательский акцент смещается на анализ способности людей интегрировать различные точки зрения (*multiple viewpoints*) на объекты или события. Можно полагать, что продуктивной теоретической основой для изучения данной способности является вышеупомянутая теория Ж. Фоконье и М. Тернера, однако требуются дальнейшие исследования.

Литература

- Ахутина Т. В., Засыпкина К. В., Романова А. А. Предпосылки и ранние этапы развития речи: новые данные // Вопросы психолингвистики. 2013. Т. 17. №1. С. 20–43.
- Бахтин М. М. Эстетика словесного творчества. / Сост. С. Г. Бочаров, примеч. С. С. Аверинцев и С. Г. Бочаров. М.: Искусство, 1979.
- Бахтин М. М. Антропологистика: Избранные труды. М.: Лабиринт, 2010.
- Зотов М. В., Андрианова Н. Е. Быстрое распознавание людей на зрительной периферии: данные процедуры «движущегося окна» // Шестая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Калининград, 23–27 июня 2014 г. Калининград: 2014. С. 300–302.
- Ирисханова О. К. Игры фокуса в языке. Семантика, синтаксис и прагматика дефокусирования. М.: Языки славянской культуры, 2014.

Кармилофф-Смит А., Клима Э., Беллуджи У., Грант Д., Бэрн-Коэн С. Существует ли языковой модуль? Язык, распознавание лиц и теория психического у детей с синдромом Уильямса // Горизонты когнитивной психологии: Хрестоматия / Под ред. В.Ф. Спиридонова, М.В. Фаликман. М.: Языки славянской культуры, 2012. С. 213–230.

Сергиенко Е. А. Революция в когнитивной психологии развития // Российский психологический журнал. 2005. Т. 2. №2. С. 44–60.

Томаселло М. Истоки человеческого общения. М.: Языки славянских культур, 2011.

Фаликман М. В. Внимание. Т. 4 серии «Общая психология» / Под ред. Б.С. Братуся. М.: Академия, 2006.

Akhtar N., Carpenter M., Tomasello M. The role of discourse novelty in early word learning // Child Development. 1996. Vol. 67. No. 2. P. 635–645. doi:10.2307/1131837

Baron-Cohen S., Leslie A. M., Frith U. Does the autistic child have a "theory of mind"? // Cognition. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 37–46. doi:10.1016/0010-0277(85)90022-8

Bock S. W., Dicke P., Thier P. How precise is gaze following in humans? // Vision Research. 2008. Vol. 48. No. 7. P. 946–957. doi:10.1016/j.visres.2008.01.011

Borji A., Parks D., Itti L. Complementary effects of gaze direction and early saliency in guiding fixations during free viewing // Journal of Vision. 2014. Vol. 14. No. 13. P. 3, 1–32. doi:10.1167/14.13.3

Butterworth G., Jarrett N. What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy // British Journal of Developmental Psychology. 1991. Vol. 9. No. 1. P. 55–72. doi:10.1111/j.2044-835X.1991.tb00862.x

Carpenter M., Liebal K. Joint attention, communication, and knowing together in infancy // Joint Attention: New Developments in Psychology, Philosophy of Mind, and Social Neuroscience. / A. Seemann (Ed.). Cambridge, MA: MIT Press, 2011. P. 159–182.

Cerf M., Frady E. P., Koch C. Faces and text attract gaze independent of the task: Experimental data and computer model // Journal of Vision. 2009. Vol. 9. No. 12. P. 10, 1–15. doi:10.1167/9.12.10

Crouzet S. M., Kirchner H., Thorpe S. J. Fast saccades toward faces: face detection in just 100 ms // Journal of Vision. 2010. Vol. 10. No. 4. P. 16, 1–17. doi:10.1167/10.4.16

Emery N. J. The eyes have it: the neuroethology, function and evolution of social gaze // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2000. Vol. 24. No. 6. P. 581–604. doi:10.1016/S0149-7634(00)00025-7

Epley N., Caruso E. M. Perspective taking: Misstepping into others' shoes // Handbook of imagination and mental simulation. / K. D. Markman, W. M. P. Klein, J. A. Suhr (Eds.). N.Y.: Psychology Press, 2008. P. 297–311.

Fauconnier G., Turner M. The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities. N.Y.: Basic Books, 2008.

Friesen C. K., Kingstone A. The eyes have it! Reflexive orienting is triggered by nonpredictive gaze // Psychonomic Bulletin & Review. 1998. Vol. 5. No. 3. P. 490–495. doi:10.3758/BF03208827

Friesen C. K., Moore C., Kingstone A. Does gaze direction really trigger a reflexive shift of spatial attention? // Brain and Cognition. 2005. Vol. 57. No. 1. P. 66–69. doi:10.1016/j.bandc.2004.08.025

Frischen A., Bayliss A. P., Tipper S. P. Gaze cueing of attention: visual attention, social cognition, and individual differences // Psychological Bulletin. 2007. Vol. 133. No. 4. P. 694–724. doi:10.1037/0033-2909.133.4.694

Komogortsev O. V., Jayarathna S., Koh D. H., Gowda S. M. Qualitative and quantitative scoring and evaluation of the eye movement classification algorithms // Proceedings of the 2010 Symposium on eye-tracking research & applications. Austin, TX: ACM, 2010. P. 65–68.

Langton S. R., Watt R. J., Bruce V. Do the eyes have it? Cues to the direction of social attention // Trends in Cognitive Sciences. 2000. Vol. 4. No. 2. P. 50–59. doi:10.1016/S1364-6613(99)01436-9

Malcolm G. L., Henderson J. M. The effects of target template specificity on visual search in real-world scenes: Evidence from eye movements // Journal of Vision. 2009. Vol. 9. No. 11. P. 8, 1–13. doi:10.1167/9.11.8

Malcolm G. L., Henderson J. M. Combining top-down processes to guide eye movements during real-world scene search // Journal of Vision. 2010. Vol. 10. No. 2. P. 4, 1–11. doi:10.1167/10.2.4

Moll H., Koring C., Carpenter M., Tomasello M. Infants determine others' focus of attention by pragmatics and exclusion // Journal of Cognition and Development. 2006. Vol. 7. No. 3. P. 411–430. doi:10.1207/s15327647jcd0703_9

Oliva A., Torralba A. Building the gist of a scene: The role of global image features in recognition // Progress in Brain Research. 2006. Vol. 155. P. 23–36. doi:10.1016/S0079-6123(06)55002-2

Risko E. F., Laidlaw K. E., Freeth M., Foulsham T., Kingstone A. Social attention with real versus reel stimuli: toward an empirical approach to concerns about ecological validity // Frontiers in Human Neuroscience. 2012. Vol. 6. P. 143, 1–11. doi:10.3389/fnhum.2012.00143

Shepherd S. V. Following gaze: gaze-following behavior as a window into social cognition // Frontiers in Integrative Neuroscience. 2010. Vol. 4. P. 5, 1–13. doi:10.3389/fnint.2010.00005

Sweetser E. Introduction: Viewpoint and perspective in language and gesture, from the ground down // Viewpoint in language: A multimodal perspective. / B. Dancygier, E. Sweetser (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. P. 1–23. doi:10.1017/CBO9781139084727.002

Todorović D. Geometrical basis of perception of gaze direction // Vision Research. 2006. Vol. 46. No. 21. P. 3549–3562. doi:10.1016/j.visres.2006.04.011

Tomasello M., Haberl K. Understanding attention: 12- and 18-month-olds know what is new for other persons // Developmental Psychology. 2003. Vol. 39. No. 5. P. 906–912. doi:10.1037/0012-1649.39.5.906

Walther D., Koch C. Modeling attention to salient proto-objects // Neural Networks. 2006. Vol. 19. No. 9. P. 1395–1407. doi:10.1016/j.neunet.2006.10.001

Yucel Z., Salah A. A., Meriçli Ç., Meriçli T., Valenti R., Gevers T. Joint attention by gaze interpolation and saliency // Cybernetics, IEEE Transactions on. 2013. Vol. 43. No. 3. P. 829–842. doi:10.1109/TSMCB.2012.2216979

research papers

Top-down and Bottom-up Joint Attention in Nonverbal Communication

Mikhail V. Zotov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Natalia E. Andrianova

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Alexey P. Voyt

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The identification of the objects of another person's attention is based on three main sources of information: gaze direction cues, bottom-up (stimulus-based) information and top-down (memory-based) information about the objects. We conducted two experiments to determine how these types of information interact in nonverbal communication. In Experiment 1, adult participants detected the objects of actors' attention in two conditions: (1) after previously watching video clips of nonverbal communicative situations; and (2) without any previous information about the situations. We varied the exposition time of the dynamic cues needed for an assessment of the actors' gaze direction. In contrast to participants who did not have previous information, participants who watched the videos showed high performance in the identification and saccadic detection of the non-salient objects of actors' attention with minimal exposition time of gaze direction cues. Participants who performed the task in the second condition determined an actor's gaze zone and then attended to salient objects within this zone. Those who performed the task in the first condition encoded information about potential objects of the actors' attention in short-term memory. Then they attended to stimuli that were congruent to this information. Experiment 2 revealed that memory-based information about the potential objects of actors' attention involves low-level visual features and localization within the scene.

Correspondence: Mikhail V. Zotov, mvzotov@mail.ru; Faculty of Psychology, Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia

Keywords: joint attention, eye movements, gaze cueing, nonverbal communication, visual search, top-down attention, communicative context, social perception, theory of mind

Copyright © 2015. Mikhail V. Zotov, Natalia E. Andrianova, Alexey P. Voyt. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original authors are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Acknowledgments. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (№13-06-00616 «Cognitive mechanisms of visual perception of social situations in normal and pathological conditions»).

Received 27 February 2015, accepted 24 March 2015.

References

- Akhtar, N., Carpenter, M., & Tomasello, M. (1996). The role of discourse novelty in early word learning. *Child Development*, 67(2), 635–645. doi:10.2307/1131837
- Akhutina, T. V., Zasyapkina, K. V., & Romanova, A. A. (2013). [Prerequisites and early stages of language development: new data]. *Journal of Psycholinguistics*, 17(1), 20–43. (Russian).
- Bakhtin, M. M. Bocharov, S. G., & Averintsev, S. S. (Eds.). (1979). *The aesthetics of verbal creation*. Moscow: Iskustvo. (Russian).
- Bakhtin, M. M. (2010). [Antropolinguistics. Selecta]. Moscow: Labirint. (Russian).
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind”? *Cognition*, 21(1), 37–46. doi:10.1016/0010-0277(85)90022-8
- Bock, S. W., Dicke, P., & Thier, P. (2008). How precise is gaze following in humans? *Vision Research*, 48(7), 946–957. doi:10.1016/j.visres.2008.01.011
- Borji, A., Parks, D., & Itti, L. (2014). Complementary effects of gaze direction and early saliency in guiding fixations during free viewing. *Journal of Vision*, 14(13), 3, 1–32. doi:10.1167/14.13.3
- Butterworth, G., & Jarrett, N. (1991). What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, 9(1), 55–72. doi:10.1111/j.2044-835X.1991.tb00862.x
- Carpenter, M., & Liebal, K. (2011). Joint attention, communication, and knowing together in infancy. In A. Seemann (Ed.), *Joint Attention: New Developments in Psychology, Philosophy of Mind, and Social Neuroscience* (pp. 159–182). Cambridge, MA: MIT Press.
- Cerf, M., Frady, E. P., & Koch, C. (2009). Faces and text attract gaze independent of the task: Experimental data and computer model. *Journal of Vision*, 9(12), 10, 1–15. doi:10.1167/9.12.10
- Crouzet, S. M., Kirchner, H., & Thorpe, S. J. (2010). Fast saccades toward faces: face detection in just 100 ms. *Journal of Vision*, 10(4), 16, 1–17. doi:10.1167/10.4.16
- Emery, N. J. (2000). The eyes have it: the neuroethology, function and evolution of social gaze. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 24(6), 581–604. doi:10.1016/S0149-7634(00)00025-7
- Epley, N., & Caruso, E. M. (2008). Perspective taking: Misstepping into others' shoes. In K. D. Markman, W. M. P. Klein, & J. A. Suhr (Eds.), *Handbook of imagination and mental simulation* (pp. 297–311). N.Y.: Psychology Press.
- Falikman, M. V. (2006). *Attention. General psychology, vol. 4*. Moscow: Academia. (Russian).
- Fauconnier, G., & Turner, M. (2008). *The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities*. N.Y.: Basic Books.
- Friesen, C. K., & Kingstone, A. (1998). The eyes have it! Reflexive orienting is triggered by nonpredictive gaze. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(3), 490–495. doi:10.3758/BF03208827
- Friesen, C. K., Moore, C., & Kingstone, A. (2005). Does gaze direction really trigger a reflexive shift of spatial attention? *Brain and Cognition*, 57(1), 66–69. doi:10.1037/0033-2909.133.4.694
- Frischen, A., Bayliss, A. P., & Tipper, S. P. (2007). Gaze cueing of attention: visual attention, social cognition, and individual differences. *Psychological Bulletin*, 133(4), 694–724. doi:10.1037/0033-2909.133.4.694
- Iriskhanova, O. K. (2014). *Igry fokusa v yazyke: semantika, sintaksis i pragmatica defokusirovaniya [Playing with linguistic focus: semantics, syntax and pragmatics of defocusing]*. Moscow: Yazyki slavyanskoy kultury. (Russian).
- Karmiloff-Smith, A., Klima, E., Bellugi, U., Grant, J., & Baron-Cohen, S. (1995). Is there a social module? Language, face processing, and theory of mind in individuals with Williams Syndrome. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(2), 196–208. doi:10.1162/jocn.1995.7.2.196
- Komogortsev, O. V., Jayarathna, S., Koh, D. H., & Gowda, S. M. (2010). Qualitative and quantitative scoring and evaluation of the eye movement classification algorithms. In *Proceedings of the 2010 Symposium on eye-tracking research & applications* (pp. 65–68). Austin, TX: ACM.
- Langton, S. R., Watt, R. J., & Bruce, V. (2000). Do the eyes have it? Cues to the direction of social attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(2), 50–59. doi:10.1016/S1364-6613(99)01436-9
- Malcolm, G. L., & Henderson, J. M. (2009). The effects of target template specificity on visual search in real-world scenes: Evidence from eye movements. *Journal of Vision*, 9(11), 8, 1–13. doi:10.1167/9.11.8
- Malcolm, G. L., & Henderson, J. M. (2010). Combining top-down processes to guide eye movements during real-world scene search. *Journal of Vision*, 10(2), 4, 1–11. doi:10.1167/10.2.4
- Moll, H., Koring, C., Carpenter, M., & Tomasello, M. (2006). Infants determine others' focus of attention by pragmatics and exclusion. *Journal of Cognition and Development*, 7(3), 411–430. doi:10.1207/s15327647jcd0703_9
- Oliva, A., & Torralba, A. (2006). Building the gist of a scene: The role of global image features in recognition. *Progress in Brain Research*, 155, 23–36. doi:10.1016/S0079-6123(06)55002-2
- Risko, E. F., Laidlaw, K. E., Freeth, M., Foulsham, T., & Kingstone, A. (2012). Social attention with real versus reel stimuli: toward an empirical approach to concerns about ecological validity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 143, 1–11. doi:10.3389/fnhum.2012.00143
- Sergienko, E. A. (2009). Revolution in the cognitive psychology of development. *Psychology in Russia: State of the Art*, 2, 327–343. doi:10.11621/pir.2009.0016
- Shepherd, S. V. (2010). Following gaze: gaze-following behavior as a window into social cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 4, 5, 1–13. doi:10.3389/fnint.2010.00005
- Sweetser, E. (2012). Introduction: Viewpoint and perspective in language and gesture, from the ground down. In B. Dancygier, & E. Sweetser (Eds.), *Viewpoint in language: A multimodal perspective* (pp. 1–23). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139084727.002
- Todorović, D. (2006). Geometrical basis of perception of gaze direction. *Vision Research*, 46(21), 3549–3562. doi:10.1016/j.visres.2006.04.011
- Tomasello, M. (2008). *Origins of human communication*. Cambridge, MA: MIT press.
- Tomasello, M., & Haberl, K. (2003). Understanding attention: 12- and 18-month-olds know what is new for other persons. *Developmental Psychology*, 39(5), 906–912. doi:10.1037/0012-1649.39.5.906
- Walther, D., & Koch, C. (2006). Modeling attention to salient proto-objects. *Neural Networks*, 19(9), 1395–1407. doi:10.1016/j.neunet.2006.10.001
- Yucel, Z., Salah, A. A., Meriçli, Ç., Meriçli, T., Valenti, R., & Gevers, T. (2013). Joint attention by gaze interpolation and saliency. *Cybernetics, IEEE Transactions on*, 43(3), 829–842. doi:10.1109/TSMCB.2012.2216979
- Zotov, M. V., & Andrianova, N. E. (2014). [Fast recognition of people in visual periphery: data from a “moving window” procedure]. In *The Sixth international conference on cognitive science. June 23–27, 2014, Kaliningrad, Russia. Abstracts* (pp. 300–302). Kaliningrad. (Russian).

research papers

The Effect of Word Frequency on the Brain Correlates of Object Naming in Russian

Roza M. Vlasova

Laboratory of Neurolinguistics, Faculty of Philology, Higher School of Economics;
Federal Center of Medicine and Rehabilitation, Moscow, Russia

Valentin E. Sinitsyn

Federal Center of Medicine and Rehabilitation, Moscow, Russia

Ekaterina V. Pechenkova

Institute of Practical Psychology and Psychoanalysis;
Federal Center of Medicine and Rehabilitation, Moscow, Russia

Abstract. The retrieval of low frequency words is usually slower than that of high frequency words. Neuroimaging research on the role of word frequency in linguistic tasks suggests candidate brain areas for the neural substrates of this effect. The only previous fMRI study of word frequency in Russian (Malutina et al., 2012) used an action naming task and obtained data that were highly inconsistent with results for other languages, findings which were mainly obtained using noun-retrieval tasks. In order to verify whether the reasons for such inconsistency were methodological or cross-linguistic, we examined the fMRI correlates of word frequency in Russian using a covert object naming task. We found that the retrieval of low frequency and high frequency nouns activated the same general pattern of brain areas typical for object naming tasks in many languages. Several brain regions were more activated in the low frequency but not the high frequency condition, including the areas and structures usually associated with linguistic processing (the inferior frontal gyrus bilaterally, the left thalamus, the left insula), visual perception (the fusiform gyrus, the inferior occipital gyrus, the middle occipital gyrus bilaterally) and cognitive and motor control (the supplementary motor area and the right cingulate gyrus). The right cingulate gyrus was the only area that responded only to the low frequency stimuli but not the high frequency items, when compared to the baseline. At the same time, we found no brain areas that responded more to high versus low word frequency. These results are generally consistent with previous fMRI studies in English, German and Chinese and therefore suggest that the inconsistency between the previous research in Russian and other languages was due to the possible interaction of the part of speech (verb or noun) and word frequency in brain mechanisms for word retrieval, rather than cross-linguistic differences.

Correspondence: Roza Vlasova, rosavlas@gmail.com; 21/4 Staraya Basmannaya ulitsa, The Neurolinguistics Laboratory at the National Research University Higher School of Economics, 105066 Moscow, Russia

Keywords: word frequency, word frequency effect, word length, object naming, covert speech, functional magnetic resonance imaging, fMRI, Russian language, part of speech, verb, noun

Copyright © 2015. Roza M. Vlasova, Valentin E. Sinitsyn, Ekaterina V. Pechenkova. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original authors are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Acknowledgments. We would like to thank Elena Merzhina for her assistance in the organization of the experiment. We are also grateful to Regina Machinskaya and Vera Kempe for their thorough and constructive comments, which helped us to greatly improve the paper. This article includes results of research supported by The National Research University – Higher School of Economics’ Academic Fund Program (research grant No. 14-01-0051) in 2014–2015.

Received 11 March 2015, accepted 28 March 2015.

Introduction

One of the main linguistic characteristics of an individual word is its frequency, or how often the word appears in a language. The effect of word frequency on response times has been shown in many behavioral studies using object naming, lexical decision and reading tasks, indicating that low frequency words are processed slower than high frequency words in both speech perception and speech production. This phenomenon is called “the word frequency effect” (Oldfield & Wingfield, 1965; Gardner, Rothkopf, Lapan, & Lafferty, 1987; Jescheniak & Levelt, 1994; Meschyan & Hernandez, 2002).

The question of which stages of speech processing may be affected by the word frequency effect is debated in the psycholinguistic literature. The evidence from behavioral studies suggest that low word frequency may slow down the stage of articulatory processing (Balota & Chumbley, 1985), lemma retrieval from a mental lexicon (Gahl, 2008) or access to the phonological word form (Jeschniak & Levelt, 1994).

Neuroimaging research may shed more light on the mechanisms of the word frequency effect because it reveals the topography of the neural sites that are associated with different stages of linguistic processing. However, functional magnetic resonance imaging (fMRI) and positron emission tomography (PET) studies of word frequency are not numerous because word frequency intrinsically correlates with a number of lexical dimensions such as conceptual familiarity, word length, and phoneme and grapheme distribution. Options for disentangling these variables are limited (Gardner et al., 1987), which makes neurolinguistic research on word frequency per se hardly possible. Nonetheless, several neurolinguistic studies approached the possible neural basis of the word frequency effect in the English language by contrasting the activation evoked by low frequency versus high frequency words (Fiez, Balota, Raichle, & Petersen, 1999; Chee, Venkatraman, Westphal, & Siong, 2003; Prabhakaran, Blumstein, Myers, Hutchison, & Britton, 2006; Graves, Grabowski, Mehta, & Gordon, 2007). Two findings were consistent across these studies despite the varieties of imaging techniques (PET or fMRI), tasks (lexical decision, reading, object naming, or semantic association), modality of stimuli (visual or auditory), modality of response (oral or motor), data acquisition design (blocked or event-related) and the baseline condition (fixation or perceptual control). First, the activation was found only for the low frequency words compared to the high frequency words, but not vice versa. Second, all patterns of activation involved the triangular and opercular parts of the left inferior frontal gyrus (IFG). Other findings included different language-specific brain areas (Price, 2012), namely the left posterior superior temporal gyrus (pSTG; Fiez et al., 1999; Graves et al., 2007) and the right IFG (Chee et al., 2003); the left middle temporal gyrus (Prabhakaran et al., 2006), which belongs to the neural substrates of semantic memory (Price, 2012; Binder, Desai, Graves, & Conant, 2009), and areas associated with cognitive effort due to increased executive control during task performance (Petersen & Posner, 2012): the supplementary motor area (SMA; Fiez et al., 1999) and the anterior cingulate cortex (Chee et al., 2003).

However, the question of whether the pattern of activation obtained for English can be generalized across languages remains open to discussion. The authors are aware of several attempts to find the neural correlates of word frequency in other languages, including German (Fiebach, Friederici, Muller, & von Cramon, 2002), Chinese (Kuo et al., 2003; Lee et al., 2004) and Russian (Malutina et al., 2012). The study by Fiebach et al. (2002) revealed a pattern of results similar to the studies in English, with activation for the low frequency compared to the high frequency nouns in the left IFG and in the insula, the thalamus, and the caudate nucleus bilaterally. The results of the two studies of covert naming of the high and low frequency Chinese characters were more complex. In both studies, the low frequency characters evoked greater activation than the high frequency characters in the IFG and insula bilaterally, in the left precentral and middle frontal gyri, the SMA, and the lingual gyri (Kuo et al., 2003; Lee et al., 2004). Each of these studies also showed a different subset of the occipito-temporal and occipito-parietal areas activated for the same contrast. In addition, Kuo et al. (2003) also found greater activation for the high frequency versus low frequency words in the left temporo-parietal region and precuneus.

The only fMRI study that explicitly tested the effect of word frequency on the blood oxygenation level dependent (BOLD) response in Russian (Malutina et al., 2012) showed specific brain activation for both low frequency and high frequency verbs. The study used low and high frequency verb retrieval in an overt action-naming task based on pictures of scenes. A perceptual control condition (distorted images) was used as a baseline. The retrieval of low frequency verbs was associated with increased activation in the right IFG and middle frontal gyrus, the right superior temporal gyrus, and bilaterally in the superior frontal and medial frontal gyri, the SMA, the cingulate cortex and in the right sensorimotor cortex. The retrieval of high frequency verbs in an action naming task was associated with bilateral activation in the occipital areas, the superior parietal gyrus, the right precuneus and cuneus, the right middle temporal gyrus, and the right orbitofrontal area.

Therefore, according to the literature, the topography of the brain correlates of word frequency in English and Russian materials differs in terms of both brain regions involved and the lateralization of the activation. In all studies on word frequency in English, the activation associated with low versus high word frequency was shown in the left IFG, while in Russian it was found in the right IFG. There was some overlap between the results for the same contrast in Russian and individual studies on English in the SMA (Graves et al., 2007), the left superior frontal gyrus (Prabhakaran et al., 2006), and the anterior cingulate (Chee et al., 2003). The contrast between high versus low frequency words has shown no activation in any studies using English materials, but there were multiple sites of activation in the study by Malutina et al. (2012).

This inconsistency may be due either to cross-linguistic differences or to methodological variation. The morphology of Russian is different from that of English. However, an explanation in terms of cross-linguistic differences does not seem plausible because the brain correlates of word frequency in Chinese were similar to those obtained for English, while Chinese is even less

similar to English than Russian (Kuo et al., 2003; Lee et al., 2004; Liu, Liao, Fang, Chu, & Tan, 2004). It is more likely that the observed inconsistency may be due to differences in the neural substrate for retrieval of nouns and verbs, since Malyutina et al. (2012) used action naming which is a verb-retrieval task, while the majority of previous fMRI research on the word frequency effect has been conducted using noun-retrieval tasks. The only study in Chinese that revealed similar but less extended activation for the opposite contrast between high versus low frequency words (Kuo et al., 2003) used a mixture of nouns and verbs as stimuli in a Chinese character-naming (reading) task. The aim of the present study was therefore to examine the neural correlates of word frequency in Russian using a noun-retrieval task.

We supposed that such an attempt would replicate the previous results on neural correlates of the word frequency effect found in other languages (Fiebach et al., 2002; Graves et al., 2007; Lee et al., 2004); namely, that several brain regions (both language-specific and associated with executive control functions) would demonstrate greater activation for low frequency nouns. We did not expect any specific activation for high frequency nouns.

Method

Participants

Sixteen native speakers of Russian (9 females and 7 males; mean age 24.3 years (SD=4.17)) volunteered to participate in the study. All of them were right-handed (Annett, 1970) and none could be classified as an early bilingual. Participants were recruited in the Moscow area and were either college students or had recently graduated from university. All volunteers had normal or corrected-to-normal visual acuity, passed an MRI safety screening, and none of them reported a history of mental illness, neurological disorders or cardiovascular disease. Informed written consent was obtained from all volunteers prior to the study in agreement with the Declaration of Helsinki.

Materials

Seventy low frequency and 70 high frequency concrete nouns were selected from "The Word Frequency Vocabulary of the Modern Russian Language" (Lyashevskaya & Sharov, 2009). Mean values and standard deviations for word frequency and length are presented in Table 1. For each concrete noun we found a realistic, colored pictorial representation of the corresponding object, compiling a set of stimuli for the two experimental conditions: 70 images for the high frequency nouns and 70 images for the low frequency nouns. Another set of 140 images for the perceptual control condition (baseline) was created by distorting the same pictures in a way that made the objects no longer identifiable; the control images contained pixels of the same brightness and color as the experimental images. Sample pictorial stimuli are shown in Figure 1.

The depicted objects were presented against a white background. True color JPEG images were projected from the control room onto a screen in the magnet room by means of an LCD projector. The presentation of stimuli was controlled by a custom script programmed using

Psychtoolbox III (Kleiner et al., 2007). Participants watched the screen from the distance of 3 meters through a mirror system mounted on the head coil, so that the screen occupied 10.6×5.9 of visual angle. Objects were centered on the screen and occupied 34% (SD=21%) of the screen area on average.

	Syllables	LogFrequency: log(ipm+1)
High frequency	2.2 (SD=0.7)	1.94 (SD=0.37)
Low frequency	2.59 (SD=0.8)	0.43 (SD=0.22)

Table 1. Means and standard deviations for length and log frequency of words corresponding to object pictures.

Procedure

Each participant completed a 15-minute session of the covert object-naming task in the scanner. Participants were asked to silently name the picture presented on the screen as soon as they saw a real world object, and to rest without removing their eyes from the screen during the presentation of the distorted objects ("blobs").

The object-naming task was chosen as a noun-retrieval task that was otherwise similar to the action-naming task used by Malyutina et al. (2012). The object-naming task was also previously employed in studies that used English material (Graves et al., 2007). The covert naming task was chosen to eliminate the task-correlated head motion that accompanies overt speech production and may introduce extra artifact activation at the contrast of interest (Gracco, Tremblay, & Pike, 2005). Covert speech tasks have been shown to preserve the major characteristics of brain activity revealed by their overt counterparts (Palmer et al., 2001; Bowyer et al., 2008), including activation in areas of the pre-motor and motor cortex that control articulation, although with a greater left lateralization (Price, 2012). For this reason, silent speech tasks are often used as the method of choice in functional neuroimaging studies of speech production (Liljestrom et al., 2008). The sparse acquisition protocol for overt naming is another reliable alternative, but it dramatically reduces the statistical power and therefore increases the duration of the experiment (Gracco, Tremblay, & Pike, 2005). At the same time, the main caveat of the covert naming task is a lack of control over participant performance. Covert naming does not provide information about the accuracy and timing of each individual response, but this issue is compensated by having a block design in the study. However, even highly compliant healthy adult participants may misunderstand the task, miss some trials or fall asleep in the scanner. For this reason, we controlled for task comprehension by including an overt practice session outside of the scanner, and for wakefulness and compliance in a pre-debriefing interview and at the stage of data analysis.

Before the main experimental session, each participant completed a short practice session outside of the scanner in order to become familiar with the procedure and the appearance of real objects and distorted images. During the practice session, the object-naming task was performed

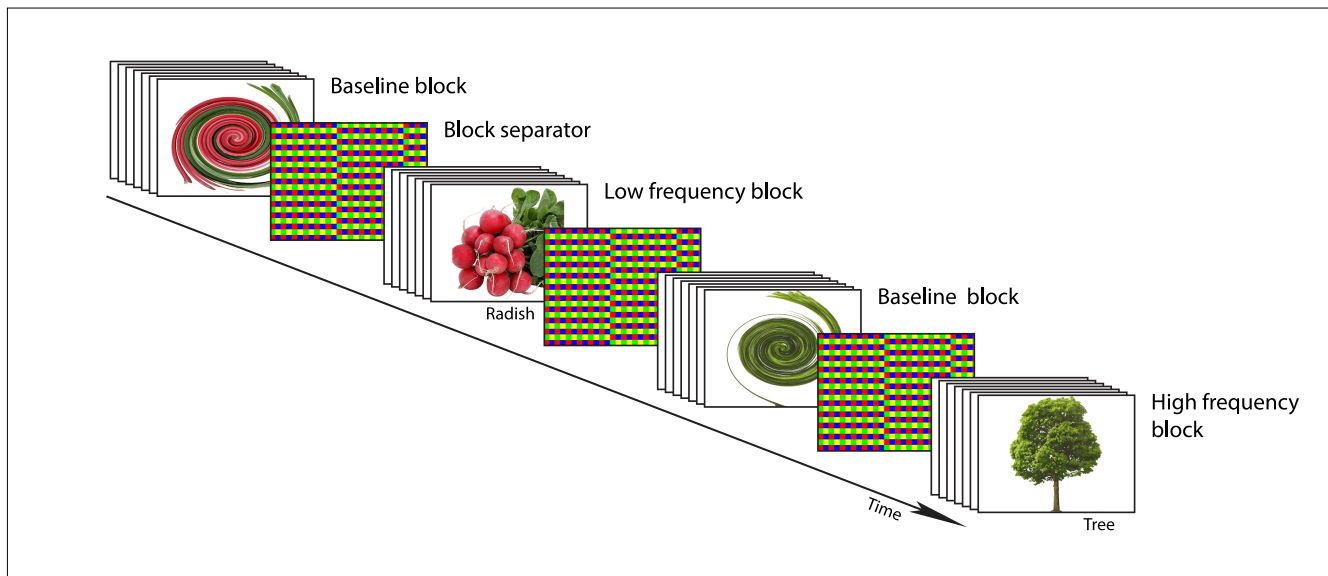


Figure 1. The schematic timeline of the block stimuli presentation during the experiment with the sample stimuli for the covert object naming task and the baseline condition. Pictures of real objects correspond to either high frequency (e.g., *tree*) or low frequency (e.g., *radish*) nouns.

aloud, so that the experimenter could ensure that the participant understood the task and was able to perform it correctly. In order to obtain another indirect indicator of task comprehension and compliance, the participants were asked to share their experience of the scanning session after the main session and before the debriefing, and to report whether any pictures were hard for them to name.

For the object-naming task, images were displayed for 3 seconds each without any interstimulus interval. The baseline and experimental conditions were administered in blocks, so that every seven successive images represented the same condition. For technical reasons, blocks were separated by colored checkerboards presented for 0.1 seconds. Blocks of high frequency and low frequency stimuli alternated and were separated by blocks of the baseline condition. There were 10 blocks of each of the two experimental conditions and 21 blocks of the baseline stimuli presentation. The very first and the very last block in the session were baseline. No baselines other than the perceptual control condition were implemented. The order of stimulus presentation was the same for all participants. No order effect at the level of individual stimuli were expected, because the effect of individual stimuli is not distinguishable in fMRI block designs. The order effects at the level of blocks were controlled with the ABAB reversal design described above. The baseline periods were introduced after each experimental block in order to allow for the decay of the hemodynamic response after each naming block and therefore minimize the BOLD signal interference from successive blocks that belong to different experimental conditions. The schematic timeline of the procedure is shown in Figure 1.

fMRI Data Acquisition and Analysis

Structural T1-weighted (MPR sequence parameters: TR = 1900 ms, TE = 2.91 ms, FA = 15°; 176 sagittal slices, interslice interval 0.75 mm; voxel size 1×1×1 mm) and functional T2*-weighted volumes (EPI sequence parameters: TR/TE/FA — 2350 ms / 50 ms / 90°; 28 slices oriented parallel to AC/PC plane, interslice interval 0.75 mm; voxel size 3.6×3.6×4 mm) were acquired using a Siemens 1.5 T Mag-

netom Avanto scanner located at the Federal Center of Medicine and Rehabilitation (Moscow, Russia). 372 functional volumes per participant were collected (3 initial volumes to achieve magnetization equilibrium and 41 blocks of 9 volumes each). Standard field map images with the same slice prescription as the functional volumes were also acquired in order to correct the distortions of the functional images evoked by the magnetic field inhomogeneity.

Neuroimaging data were analyzed as a block design with two experimental conditions (pictures for retrieving low frequency and high frequency words) and one baseline condition (distorted pictures). The data were processed using SPM8 software (Wellcome Institute of Cognitive Neurology, www.fil.ion.ucl.ac.uk). The first three volumes of each session were discarded. Image preprocessing included fieldmap-based realignment and unwarping of the functional images, coregistration of structural and functional images, segmentation of the structural images and spatial normalization to the standard EPI MNI template for both structural and functional images. For functional images, spatial smoothing with an isotropic 8-mm Gaussian kernel and a temporal high-pass filter (169-second cut off) were also applied.

Data were modeled using the general linear model (Friston et al., 1994). For each participant, one session with two conditions (low frequency words, high frequency words) was modeled using the canonical hemodynamic response function. The baseline condition was not explicitly modeled to avoid model redundancy. Images for one-sided t-contrasts of the BOLD signal change over the mean value for the session were obtained from each participant for the following contrasts: low frequency words vs. baseline, high frequency words vs. baseline, low frequency words vs. high frequency words and high frequency words vs. low frequency words. T-contrast images from individual participants were combined for a group random effect analysis. The same four one-sided t-contrasts that were obtained for the subject-level analysis were also computed at the group level. Peak activation voxels from the group analysis were reported in MNI coordinates with voxelwise uncorrected

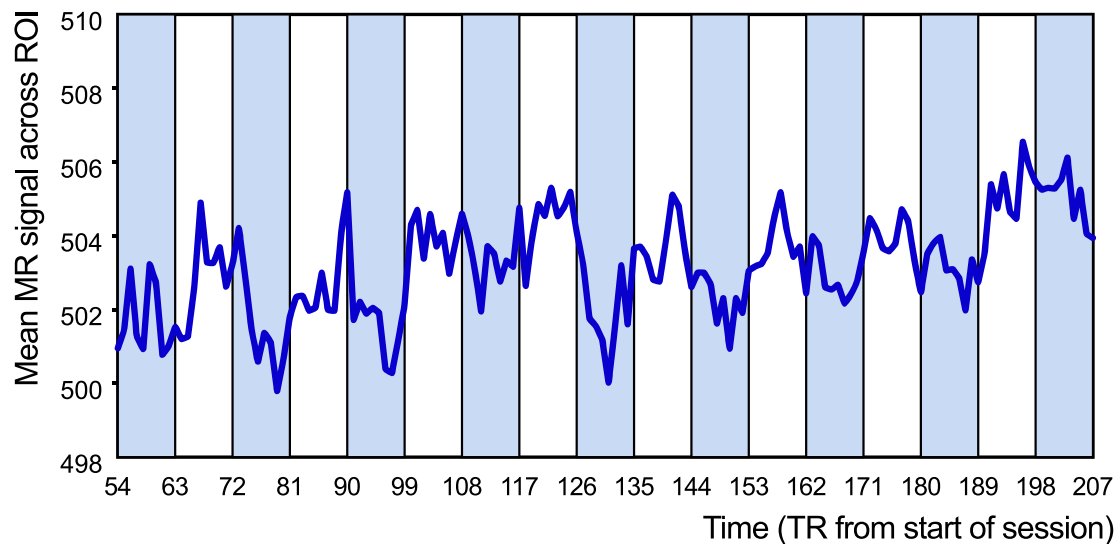


Figure 2. The sample time course of the raw signal within the IFG region of interest during the fMRI session in a single subject (shaded = periods of rest condition; white = periods of naming condition).

statistical threshold $p=.001$ after topological FDR correction for multiple comparisons at the cluster level (Chumbley & Friston, 2009), $q=.05$.

Since we were unable to match low frequency and high frequency words on length (low frequency words were slightly longer than high frequency words), the effect of word length in number of syllables was assessed using a separate parametric design. The individual and group level one-sided t -contrast images were computed and statistically thresholded in the same way as the main contrasts of interest mentioned above.

The group activation maps were overlaid on the average of the individual structural images normalized to MNI space. The correspondence between the clusters of activated voxels in the group data and the anatomical structures was established by means of the *Peak_nii* software v.7 (http://www.nitrc.org/projects/peak_nii) on the basis of the Harvard-Oxford probabilistic brain atlas (Desikan et al., 2006).

Additional control for the task performance at the stage of data analysis was performed according to the line of reasoning suggested by Owen et al. (2006) and Monti et al. (2010) for motor and visual mental imagery tasks in unresponsive patients. For a long block-designed fMRI session with blocks lasting for 20–30 seconds and without any external stimuli other than oral instructions between the blocks, it is highly improbable that the time-course of the BOLD signal in a priori defined task-related functional regions of interest would systematically vary with the block onset and offset without the participant performing the imagery task. For the covert naming task, the same methodology may be applied for the region of interest that demonstrates a high percent signal change for speech production but is not activated during the passive viewing of stimuli. According to these criteria, the opercular and triangular parts of the left IFG (Ullman, 2006) was chosen as a region of interest since in the speech task the IFG often demonstrates BOLD signal change noticeable even with a visual inspection of the MR signal plot, and the activation

of this region is not triggered by a mere presence of the visual stimuli. The ROI was defined with a template from the WFU Pickatlas (Maldjian, Laurienti, Kraft, & Burdette, 2003), and the time courses from the ROI were extracted with the Marsbar toolbox (Brett, Anton, Valabregue, & Poline, 2002). A sample time course of the raw MR signal in this ROI after the preprocessing of the functional images in a single participant is shown in Figure 2. Even when contaminated by the linear trend and fluctuations, there is systematic variation with the delays of the hemodynamic response and the higher signal for the naming task blocks compared to the baseline blocks.

Results

No data were discarded due to a lack of wakefulness or compliance in the participants, according to the pre-debriefing interview and analysis of the BOLD signal within the ROI comprised by triangular and opercular parts of the left IFG. The contrast of the naming task (aggregated across both high and low frequency blocks) against the baseline in the whole-brain analysis showed activation in the IFG in every participant at the uncorrected statistical threshold of $p<.001$ and in 14 out of 16 participants at the voxelwise FWE-corrected statistical threshold of $p<.05$, ensuring that the participants properly performed the covert naming task in the scanner.

With respect to the baseline, retrieval of both low frequency and high frequency nouns evoked bilateral activation in the fusiform gyrus, the inferior occipital gyrus and the middle occipital gyrus, the SMA, the precentral gyrus, the IFG and the left postcentral and supramarginal gyri (see Figures 3 and 4, Appendix Tables A1 and A2).

Several brain regions were more activated for the retrieval of low frequency words in comparison with high frequency words. This increase was found bilaterally in the fusiform gyrus, the inferior occipital gyrus, the middle occipital gyrus, the SMA and the IFG; it also appeared

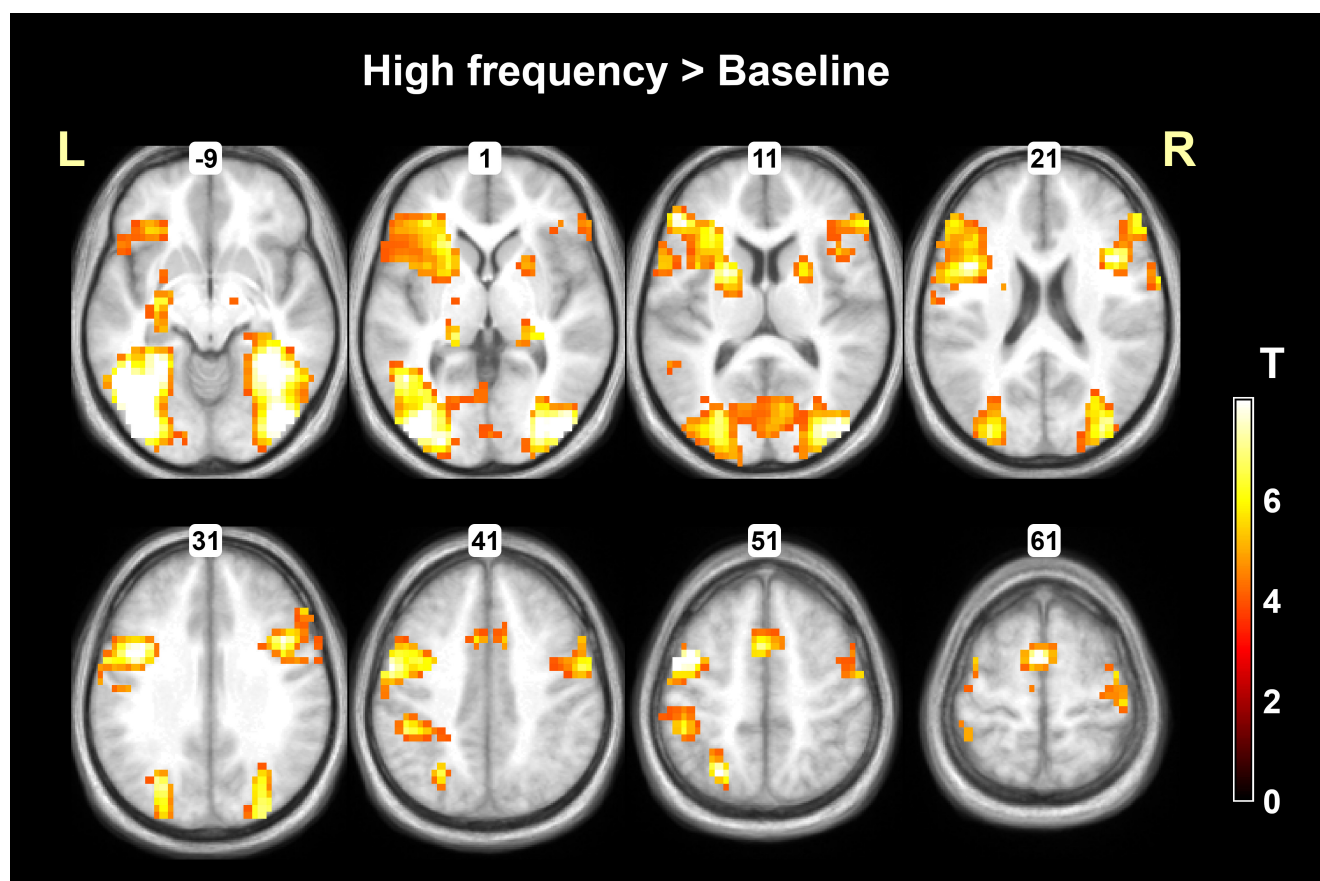


Figure 3. Activation maps for the contrast of high frequency words vs. baseline. Maps are thresholded at $p < .001$ (uncorrected at the voxel level) and FDR-corrected at the cluster level with $q = .05$ ($FDR_c = 36$). Activation maps are overlaid over the average of the spatially normalized structural image of all participants. Coordinates (z) are given in MNI space.

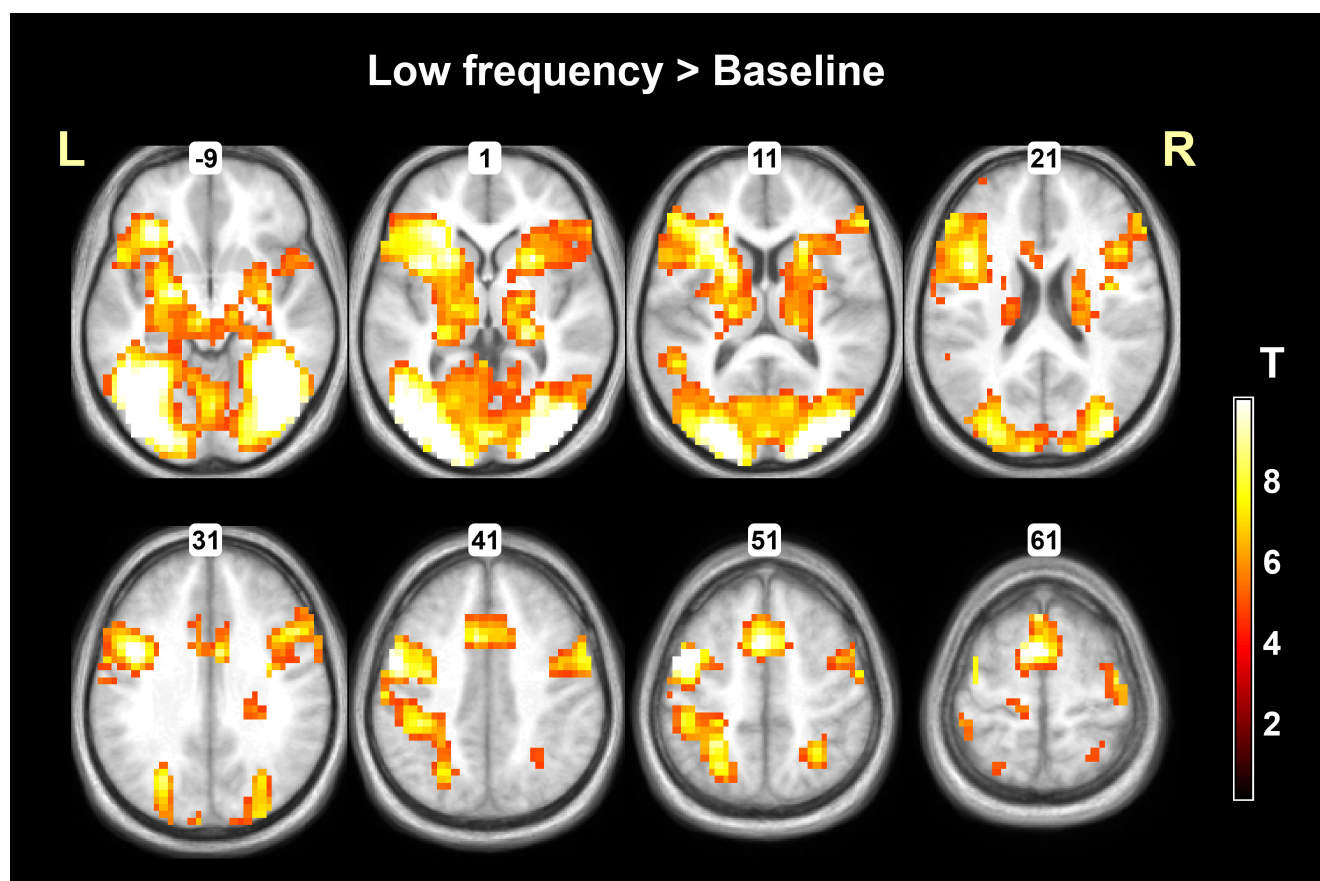


Figure 4. Activation maps for the contrast of low frequency words vs. baseline. Maps are thresholded at $p < .001$ (uncorrected at the voxel level) and FDR-corrected at the cluster level with $q = .05$ ($FDR_c = 420$). Activation maps are overlaid over the average of the spatially normalized structural image of all participants. Coordinates (z) are given in MNI space.

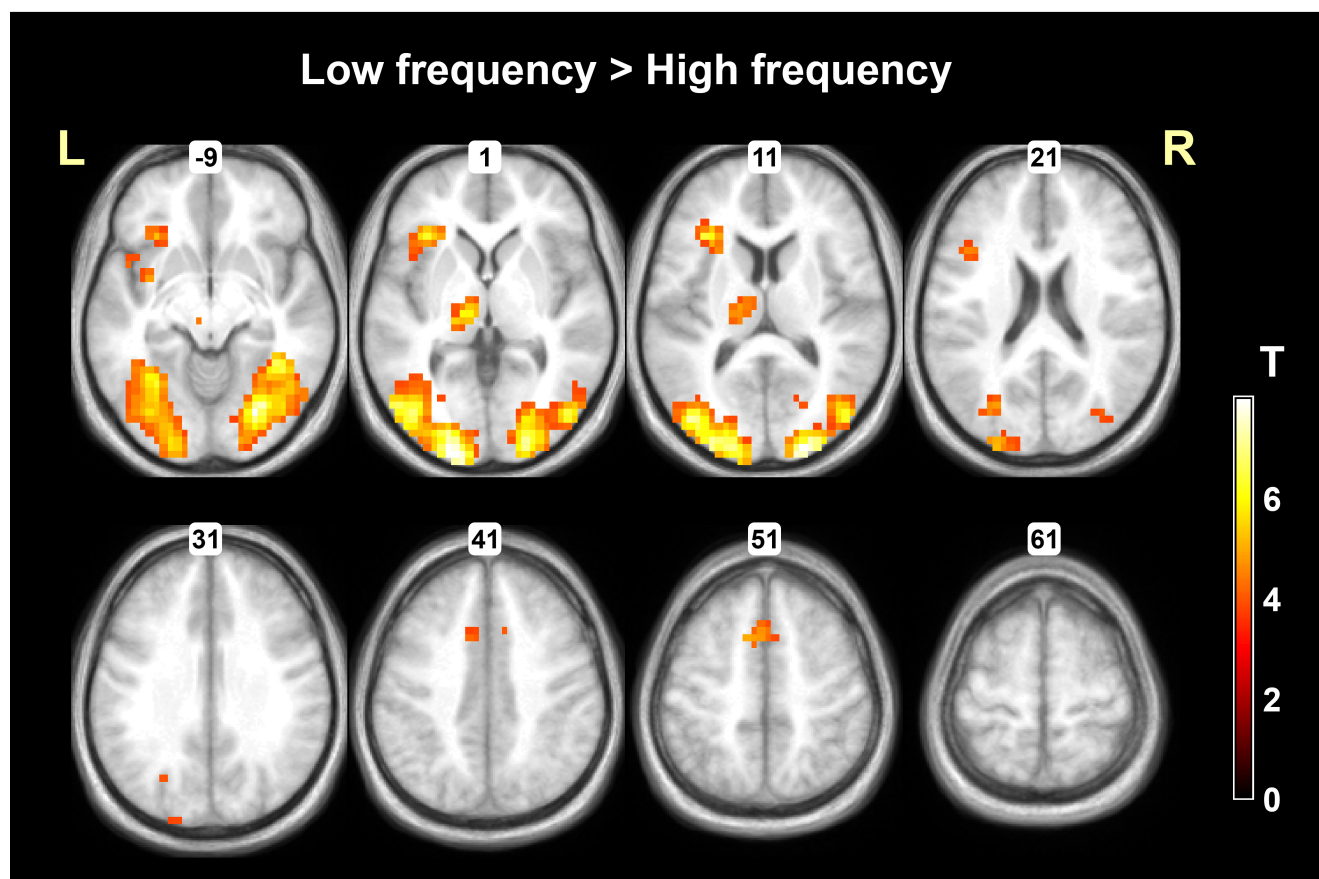


Figure 5. Activation maps for the contrast of high frequency words vs. low frequency words. Maps are thresholded at $p < .001$ (uncorrected at the voxel level) and FDR-corrected at the cluster level with $q = .05$ ($FDR_c = .36$). Activation maps are overlaid over the average of the spatially normalized structural image of all participants. Coordinates (z) are given in MNI space.

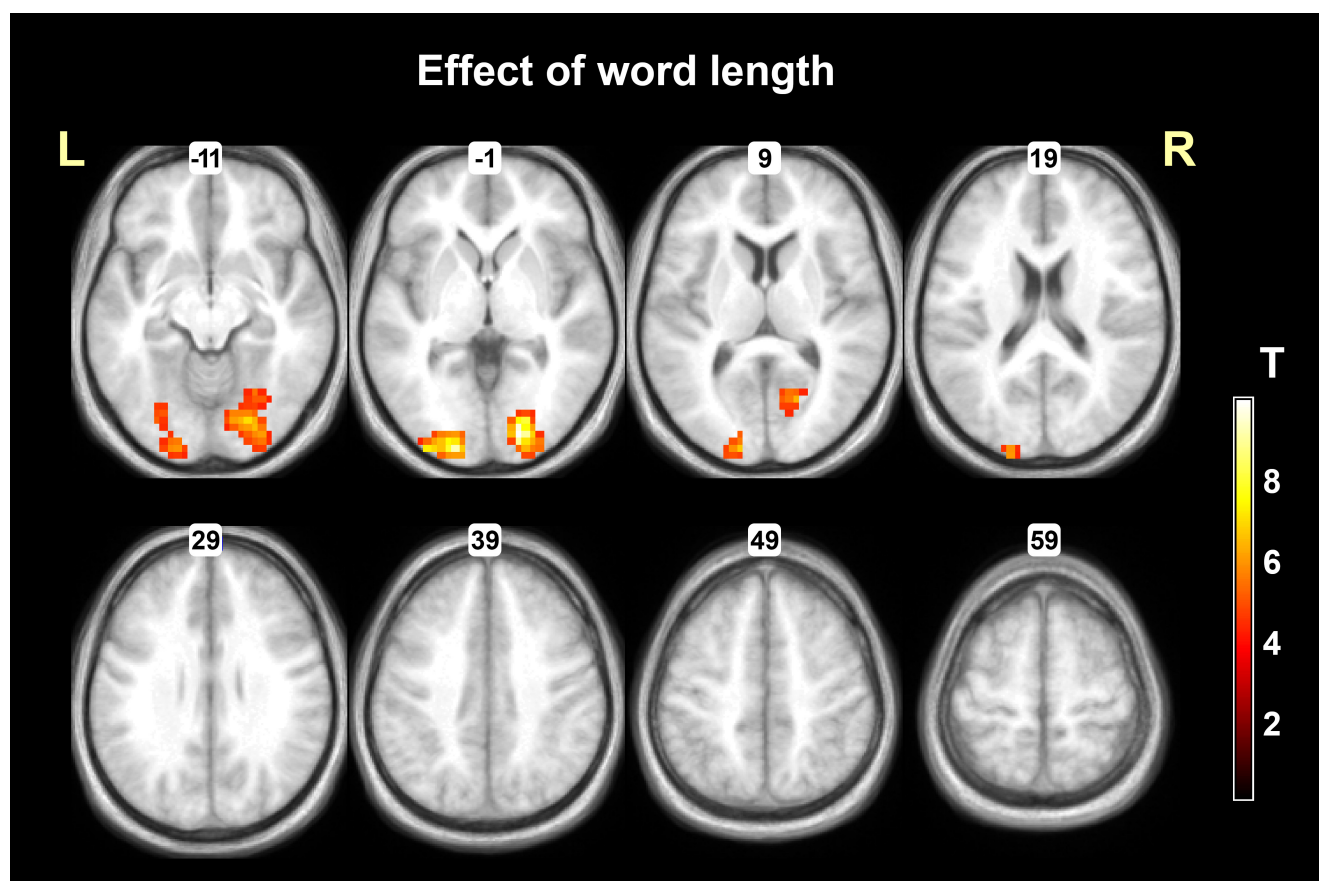


Figure 6. Effect of the parametric modulator showing areas associated with the word length. Maps are thresholded at $p < .001$ (uncorrected at the voxel level) and FDR-corrected at the cluster level with $q = .05$ ($FDR_c = .21$). Activation maps are overlaid over the average of the spatially normalized structural image of all participants. Coordinates (z) are given in MNI space.

Brain structures within the cluster	Peak MNI coordinates			T statistics	K (cluster size)
	x	y	z		
L. Temporal Occipital Fusiform Cortex	-30	-60	-6	9.73	666
L. Occipital Pole	-20	-98	0	7.91	
L. Lateral Occipital Cortex, inferior division	-42	-80	6	7.29	
L. Temporal Occipital Fusiform Cortex	-38	-48	-18	6.24	
L. Occipital Fusiform Gyrus	-42	-64	-18	4.94	
L. Frontal Operculum Cortex	-34	24	10	6.34	137
L. Insular Cortex	-34	24	2	6.25	
L. Temporal Pole	-38	8	-18	5.56	
L. Frontal Orbital Cortex	-30	24	-10	5.22	
L. Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis	-42	16	22	4.51	
R. Occipital Pole	22	-96	6	8.30	542
R. Occipital Fusiform Gyrus	26	-72	-6	8.15	
R. Temporal Occipital Fusiform Cortex	42	-48	-14	7.09	
R. Lateral Occipital Cortex, superior division	46	-80	14	6.62	
R. Lateral Occipital Cortex, inferior division	46	-76	2	6.43	
L. Thalamus	-14	-20	6	6.50	67
L. Insula	-26	-20	18	4.22	
L. Paracingulate Gyrus (the supplementary motor area)*	-6	12	46	5.06	36
R. Paracingulate Gyrus (the anterior cingulate cortex)*	10	20	38	4.34	

Table 2. Brain regions demonstrating significant activation in one-sided whole-brain t-contrast between the experimental conditions (retrieval of the low vs. high frequency words). *Note.* Cluster extent is given as voxel count after spatial normalization to MNI space with each voxel dimensions of 4×4×4 mm. Statistical significance: $p < .001$ uncorrected at voxel level, FDR-corrected at cluster level ($q = .05$, $FDR_c = 36$).

* The more precise anatomical labels are given in the brackets on the basis of the MNI coordinates of single activation peaks according to the SPM anatomy toolbox.

in the left thalamus, the left insula, and the right cingulate gyrus (see Figure 5, Table 2). We found no brain areas that responded more to high frequency words in comparison with low frequency words.

The neural correlates of word length in the object naming task, assessed by a separate parametric design that introduced word length in syllables as a parametric modulator for the object naming condition (without further division into low and high frequency word retrieval) included only the bilateral activation in the posterior brain regions, namely the calcarine sulcus, the lingual gyrus, and the inferior occipital gyrus (Figure 6).

Discussion

Our study presents an attempt to replicate, with Russian language materials, the pattern of the neural correlates of word frequency earlier reported in the literature for the English language. The only previous study in Russian, by Malutina et al. (2012), showed substantial discrepancies with the literature on English and German, which we consider to be due to methodological rather than cross-linguistic issues. However, so far no proper cross-linguistic study has been conducted that implements exactly the same methodology on the material of two or more different languages. More-

over, all existing research substantially varies by methodology, and no single neurolinguistic study of the word frequency effect exactly replicates the methodology of any other study.

Neural Substrates of the Object-Naming Task

We found that the retrieval of low frequency and high frequency words activated generally the same brain areas when compared to the baseline. The greatest volume of activation was found in the IFG, the SMA, the fusiform gyrus, the inferior occipital gyrus, and the middle occipital gyrus bilaterally. This pattern of activation is typical for object naming tasks, both overt and covert (Liljestrom et al., 2008; Kan & Thompson-Schill, 2004). The individual brain regions comprising this pattern are often associated with cognitive processes involved in object-naming tasks such as the recognition of a visual stimulus, access to word meanings (to the main semantic features of a concept), access to phonological word forms, and motor control, including programming and the planning of articulation (DeLeon et al., 2007). The activation elicited by the object naming task therefore encompasses brain areas involved in the storage of the visual object and word representations at different levels (lexical-semantic representation in the temporal lobes and visual representations of an object and its corresponding word in the occipito-temporal regions), as well as execution of word retrieval in the IFG (Kan & Thompson-Schill, 2004) and the SMA (Alario, Chainay, Lihericy, & Cohen, 2006; DeLeon, 2007).

Effect of Word Frequency on Brain Activation

The extra time required to retrieve low frequency words, as reflected by the word frequency effect, may be associated with neural processes within the same set of brain areas that are involved in the processing of high frequency words (Liu et al., 2004). Alternatively, extra response time may reflect the recruitment of an additional set of brain areas associated with cognitive control. Our results support the idea that these two options are not mutually exclusive.

As expected, we found specific activation patterns for the retrieval of low frequency words in comparison with high frequency words, and no specific activation for high frequency words in comparison with low frequency words.

The retrieval of low frequency words in comparison to high frequency words elicits greater cortical activation in both language-specific brain areas (the IFG) and regions associated with visual perception (the fusiform gyrus, the middle occipital gyrus, the inferior occipital gyrus) or executive control (the SMA and the cingulate gyrus). The cingulate gyrus was the only brain region in this list that responded to the low but not the high frequency items when compared to the baseline. The greater overall activation evoked by the low frequency words can be explained by the increasing cognitive demands required for low frequency word retrieval.

Higher mental effort is usually coupled with greater brain activation in fMRI research. Two potential reasons for the correlation include the longer neural processes for the difficult trials within the same brain areas that underlie the performance of the easy trials (which is reflected in both the greater reaction time and more durable BOLD response (Grinband, Wager, Lindquist, Ferrera, & Hirsch,

2008; Yarkoni, Barch, Gray, Conturo & Braver, 2009)) and recruitment of more general, non-specific cognitive control processes when the task is difficult. An effect of increased brain activation in the task-specific regions due to higher task difficulty was shown in different modalities. For example, such an effect can be seen in the primary motor area as a response to higher tapping rates (Liu et al., 2004; Khushu et al., 2001) or in brain regions associated with speech comprehension as a response to higher syntactic and lexical complexity (Keller, Carpenter, & Just, 2001).

In the context of the object naming task, the left IFG cannot be unambiguously classified as either “linguistic” or “cognitive control” nodes even though it contains Broca’s area which is a classical candidate for the dedicated language processing module in the brain (Falk, 2007). First, Broca’s area has shown to be involved in a range of higher mental functions including working memory, calculation and the perception and production of music (Fadiga, Craighero, & D’Ausilio, 2009). Second, even with respect to its linguistic functions, the IFG is involved in the retrieval of information from the semantic memory (Kan & Thompson-Schill, 2004), which is a type of control process. Considering the correlation between the IFG activation and word frequency, Chee et al. (2002) proposed that the IFG activation correlates with the mental effort required by the voluntary retrieval of semantic information, since they observed the word frequency effect on the IFG activation only in an active semantic judgment task, but not in a relatively passive reading condition.

The involvement of the left thalamus and the left insula in the retrieval of low frequency nouns can also be explained on the basis of previous research showing that these structures are involved in the phonological and semantic aspects of word processing. Several neuropsychological and neuroimaging studies have shown that lesions in the left thalamus result in difficulties in the retrieval of words from semantic memory (Mori, Yamadori, & Mitani, 1986; Segal, Williams, Kraut, & Hart, 2003), and the atrophy of grey matter in the left insula leads to word-finding failures and increased phonological retrieval deficits, or tip-of-the-tongue states (Shafto, Bruke, Stamatakis, Tam, & Tyler, 2007).

The functional role of the right cingulate cortex is shaped by its connections with the left frontal cortex (Chang, Lee, Lui, & Lai, 2007). The cingulate cortex takes part in the initialization and execution of the word retrieval process (Chang et al., 2007; Crosson et al., 1999), so the activation of the cingulate cortex in picture naming may reflect the proportion of controlled versus automatic processing. So, greater activation in the cingulate cortex during the retrieval of low frequency compared to high frequency words reflects the increase of cognitive control associated with processing low frequency words (Petersen & Posner, 2012). Remarkably, no activation in the cingulate cortex was found in the contrast of high frequency word retrieval versus the baseline, which illustrates the idea of recruitment of the extra neural substrate with the increase of cognitive control and mental effort.

While the ventral occipitotemporal regions are intrinsically involved in the object-naming task since it requires visual perception of a corresponding object, the differential activation of this region for the low and high frequency word

conditions is surprising. However, the response of the visual areas may be affected by the overall attractiveness of the depicted objects or the associated mental effort (infrequent words may correspond to less frequently encountered visual objects, which are more interesting for the participants or require more attention to identify the object and perform the naming task), or by distribution of visual categories (animals, tools, food, etc.) and corresponding high-level visual features within groups of objects depicting low and high frequency words. Interestingly, the differential activation in the occipital cortex and the fusiform gyrus for the different word frequency items was not found in the object naming study by Graves et al. (2007), which restricted the object set to only categories of animals and tools in both high and low word frequency conditions and therefore provided control for the visual semantics.

Word Length Effect

The distribution of words and objects across semantic categories is only one example of potential confounds that highly correlate with word frequency. The most obvious psycholinguistic variable that is associated with word frequency is word length. The neurolinguistic model of speech production proposed by Graves et al. (2007) implies that word frequency per se should influence only the lexical phonological stage of linguistic processing which is associated with the activation in the posterior STG, while word length should influence activation in the articulation-related areas such as the precentral gyri. However, we found no evidence for the modulation of activity of the motor, premotor or prefrontal cortex by word length. The only brain regions that were influenced by word length in the covert object-naming task were found in the visual cortex. A similar lack of evidence for fMRI correlates of word length in brain regions associated with language processing and cognitive or motor control was previously reported by Tyler et al. (2004). Thus, our main results on the correlates of word frequency were not contaminated by word length.

Correspondence with Data from Other Languages

Our results did not replicate the findings by Malutina et al. (2012) on Russian, and were more consistent with the previous data on English and German. Unlike Malutina et al. (2012) but in accordance with Fiez et al. (1999), Fiebach et al. (2002), Chee et al. (2002), Chee et al. (2003), Liu et al. (2004), Prabhakaran et al. (2006) and Graves et al. (2007), we found greater activation in the left IFG for the contrast between the retrieval of low versus high frequency words, and no specific activation anywhere in the brain for the opposite contrast. Consistent with all the previous studies, including the aforementioned studies in English, German and Russian and two studies in Chinese (Kuo et al., 2003; Lee et al., 2004), we found extra activation in the SMA for the retrieval of low frequency words compared to high frequency words. Most other parts of the activation pattern revealed in our study for the retrieval of low versus high frequency words were also described before in several studies and languages: the right IFG (in English, Chee et al. (2003); in Chinese, Lee et al. (2004); in Russian, Malutina et al. (2012)), the insula (in English, Fiez et al., (1999); in German, Fiebach et al. (2002); in Chinese, Kuo et al. (2003) and

Lee et al. (2004)), the anterior cingulate cortex (in English, Chee et al. (2003); in Chinese, Lee et al. (2004); in Russian, Malutina et al. (2012)), and the thalamus (in German, Fiebach et al. (2002); in Chinese, Lee et al. (2004)). Remarkably, the excessive activation in the occipitotemporal region for the retrieval of the low frequency words was reported before only in studies on Chinese (Kuo et al., 2003; Lee et al., 2004). However, these two studies were the only previous investigations of the word frequency effect implementing covert speech tasks. Finally, contrary to the substantial body of earlier research (Fiez et al., 1999; Lee et al., 2004; Prabhakaran et al., 2006; Graves et al., 2007; Malutina et al., 2012), but in correspondence with some other evidence (Fiebach et al., 2002; Chee et al., 2003; Kuo et al., 2003) we did not find greater activation for the retrieval of low frequency words in the superior or middle temporal cortex, which is considered to be an important neural substrate of semantic memory (Price, 2012). This controversy and the contribution of the temporal cortex to the word frequency effect might be clarified by using methods with better spatial and temporal resolution than fMRI can provide, such as electrocorticography (Kang, 2012).

Our results suggest that the discrepancy between the neural correlates of word frequency found by Malutina et al. (2012) and those from the earlier literature can be explained in terms of methodology, rather than cross-linguistic differences (Russian versus English, German and Chinese). Unlike the previous research and the present study, Malutina et al. (2012) used a verb retrieval (action naming) task. Notably, the only other study that found a specific pattern of activation for the high frequency against the low frequency word retrieval was the study by Kuo et al. (2003), which involved covert naming of Chinese characters representing both nouns and verbs.

The differences between object and action naming tasks were clearly shown by Liljestrom et al. (2008). According to their results, action naming and object naming shared such cortical substrates as the left IFG and bilateral occipitotemporal and parietal regions. Nevertheless, pictures of actions evoked more activation than object images in another set of regions, including the left superior medial frontal gyrus, left precentral gyrus, right insula, left temporo-parietal junction, and the posterior middle temporal cortex bilaterally. The authors attributed these differences to the processing of action knowledge associated with the action naming task. However, it is still unknown whether word frequency effects would recruit different neural substrates for nouns and verbs.

Therefore, in the context of previous research, our results also indicate a possible role for part-of-speech and possible interactions between part-of-speech and word frequency in the brain mechanisms for word retrieval.

Conclusions

Compared to the retrieval of high frequency words, the retrieval of low frequency words takes more time (the word frequency effect) and elicits higher activation in a number of brain areas. Despite variation in methodologies, earlier research with speakers of English, German and Chinese has consistently shown higher activation in the left IFG for

low versus high frequency word retrieval, and no specific activation for the opposite contrast. The present study replicates these two main findings for the Russian language. Our data are therefore inconsistent with a previous attempt to find the neural correlates of word frequency in Russian by Malutina et al. (2012), which showed a different pattern of results. We suggest that the inconsistency between the previous research in Russian and the other languages may be due to the effect of part-of-speech (verb versus noun) on the neural correlates of word frequency, rather than being a result of language differences. Other brain regions activated by the retrieval of the low versus high frequency words in an object naming task that were found in the present study were also reported in previous neuroimaging research on the effects of word frequency in at least one language. These regions include areas associated with linguistic processing (the right IFG, the insula bilaterally, the right thalamus), cognitive and motor control (the SMA, the right anterior cingulate cortex) and visual perception (the occipito-temporal region). At the same time, contrary to several previous studies in English and Chinese (Fiez et al., 1999; Lee et al., 2004; Prabhakaran et al., 2006; Graves et al., 2007), we found no effects of word frequency in the superior and middle temporal gyri, which are usually considered to be the neural substrates of semantic memory. Overall, our results indicate that the pattern of effects of word frequency on brain activation in word-retrieval tasks may be shaped by both research methodology and potential cross-linguistic differences.

References

- Alario, F.-X., Chainay, H., Lehericy, S., & Cohen, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research*, 1076(1), 129–143. doi:10.1016/j.brainres.2005.11.104
- Annett, M. (1970). A classification of hand preference by association analysis. *British Journal of Psychology*, 61(3), 303–321. doi:10.1111/j.2044-8295.1970.tb01248.x
- Balota, D. A., & Chumbley, J. I. (1985). The locus of word-frequency effects in the pronunciation task: Lexical access and/or production? *Journal of Memory and Language*, 24(1), 89–106. doi:10.1016/0749-596X(85)90017-8
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 19(12), 2767–2796. doi:10.1093/cercor/bhp055
- Bowyer, S., Moran, J., Seaman, S., Young, R., Sullivan, J., Farjam, R., Tepley, N., & Hsieh, L. (2008). Language processes during overt and covert speech in a simulated driving task. In *Proceedings of the 16th International Conference on Biomagnetism, Sapporo, Japan, Aug 2008* (pp. 25–29).
- Brett, M., Anton, J.-L., Valabregue, R., & Poline, J.-B. (2002). Region of interest analysis using the MarsBar toolbox for SPM 99. *Neuroimage*, 16(2), S497.
- Chang, C.-C., Lee, Y. C., Lui, C.-C., & Lai, S.-L. (2007). Right anterior cingulate cortex infarction and transient speech aspon-taneity. *Archives of Neurology*, 64(3), 442–446. doi:10.1001/archneur.64.3.442
- Chee, M. W., Hon, N. H., Caplan, D., Lee, H. L., & Goh, J. (2002). Frequency of concrete words modulates prefrontal activation during semantic judgments. *Neuroimage*, 16(1), 259–268. doi:10.1006/nimg.2002.1061
- Chee, M. W., Venkatraman, V., Westphal, C., & Siong, S. C. (2003). Comparison of block and event-related fMRI designs in evaluating the word-frequency effect. *Human Brain Mapping*, 18(3), 186–193. doi:10.1002/hbm.10092
- Chumbley, J. R., & Friston, K. J. (2009). False discovery rate revisited: FDR and topological inference using Gaussian random fields. *Neuroimage*, 44(1), 62–70. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.05.021
- Crosson, B., Sadek, J. R., Bobholz, J. A., Gökçay, D., Mohr, C. M., Leonard, C. M., Maron, L., Auerbach, E. J., Browd, S. R., Freeman, A. J., & Briggs, R. W. (1999). Activity in the paracingulate and cingulate sulci during word generation: an fMRI study of functional anatomy. *Cerebral Cortex*, 9(4), 307–316. doi:10.1093/cercor/9.4.307
- DeLeon, J., Gottesman, R. F., Kleinman, J. T., Newhart, M., Davis, C., Heidler-Gary, J., Lee, A., & Hillis, A. E. (2007). Neural regions essential for distinct cognitive processes underlying picture naming. *Brain*, 130(5), 1408–1422. doi:10.1093/brain/awm011
- Desikan, R. S., Ségonne, F., Fischl, B., Quinn, B. T., Dickerson, B. C., Blacker, D., Buckner, R. L., Dale, A. M., Maguire, R. P., Hyman, B. T., Alberti, M. S., & Killiany, R. J. (2006). An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *Neuroimage*, 31(3), 968–980. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.01.021
- Fadiga, L., Craighero, L., & D'Ausilio, A. (2009). Broca's area in language, action, and music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 448–458. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04582.x
- Falk, D. (2007). The evolution of Broca's area. *IBRO History of Neuroscience*.
- Fiebach, C., Friederici, A., Müller, K., & von Cramon, D. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 11–23. doi:10.1162/089892902317205285
- Fiez, J. A., Balota, D. A., Raichle, M. E., & Petersen, S. E. (1999). Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron*, 24(1), 205–218. doi:10.1016/S0896-6273(00)80833-8
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J.-P., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1994). Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2(4), 189–210. doi:10.1002/hbm.460010306
- Gahl, S. (2008). Time and thyme are not homophones: The effect of lemma frequency on word durations in spontaneous speech. *Language*, 84(3), 474–496.
- Gardner, M. K., Rothkopf, E., Lapan, R., & Lafferty, T. (1987). The word frequency effect in lexical decision: Finding a frequency-based component. *Memory & Cognition*, 15(1), 24–28. doi:10.3758/BF03197709
- Gracco, V. L., Tremblay, P., & Pike, B. (2005). Imaging speech production using fMRI. *Neuroimage*, 26(1), 294–301. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.01.033
- Graves, W. W., Grabowski, T. J., Mehta, S., & Gordon, J. K. (2007). A neural signature of phonological access: distinguishing the effects of word frequency from familiarity and length in overt picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(4), 617–631. doi:10.1162/jocn.2007.19.4.617
- Grinband, J., Wager, T. D., Lindquist, M., Ferrera, V. P., & Hirsch, J. (2008). Detection of time-varying signals in event-related fMRI designs. *Neuroimage*, 43(3), 509–520. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.07.065
- Jeschke, J. D., & Levelt, W. J. (1994). Word frequency effects in speech production: Retrieval of syntactic information and of phonological form. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20(4), 824–843. doi:10.1037/0278-7393.20.4.824
- Kan, I. P., & Thompson-Schill, S. L. (2004). Effect of name agreement on prefrontal activity during overt and covert picture naming. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(1), 43–57. doi:10.3758/CABN.4.1.43
- Kang, S. (2012). Neural basis of the Word Frequency Effect and Its Relation to Lexical Processing. *UC Berkeley Phonology lab annual report*.

- Keller, T.A., Carpenter, P.A., & Just, M.A. (2001). The neural bases of sentence comprehension: a fMRI examination of syntactic and lexical processing. *Cerebral Cortex*, 11(3), 223–237. doi:10.1093/cercor/11.3.223
- Khushu, S., Kumaran, S., Tripathi, R., Gupta, A., Jain, P., & Jain, V. (2001). Functional magnetic resonance imaging of the primary motor cortex in humans: response to increased functional demands. *Journal of Biosciences*, 26(2), 205–215. doi:10.1007/BF02703644
- Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in Psychtoolbox-3. *Perception*, 36(14), 1.
- Kuo, W.-J., Yeh, T.-C., Lee, C.-Y., Wu, Y.-T., Chou, C.-C., Ho, L.-T., Hung, D.L., Tzeng, O.J., & Hsieh, J.-C. (2003). Frequency effects of Chinese character processing in the brain: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, 18(3), 720–730. doi:10.1016/S1053-8119(03)00015-6
- Lee, C.-Y., Tsai, J.-L., Kuo, W.-J., Yeh, T.-C., Wu, Y.-T., Ho, L.-T., Hung, D.L., Tzeng, O.J., & Hsieh, J.-C. (2004). Neuronal correlates of consistency and frequency effects on Chinese character naming: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, 23(4), 1235–1245. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.07.064
- Liljeström, M., Tarkiainen, A., Parviainen, T., Kujala, J., Numminen, J., Hiltunen, J., Laine, M., & Salmelin, R. (2008). Perceiving and naming actions and objects. *Neuroimage*, 41(3), 1132–1141. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.03.016
- Liu, H.-L., Liao, W.-T., Fang, S.-Y., Chu, T.-C., & Tan, L.H. (2004). Correlation between temporal response of fMRI and fast reaction time in a language task. *Magnetic Resonance Imaging*, 22(4), 451–455. doi:10.1016/j.mri.2004.01.003
- Lyashevskaya, O.N., & Sharov, S.A. (2009). [Frequency dictionary of the modern Russian language (the Russian National Corpus)]. Moscow: Azbukovnik. (Russian).
- Maldjian, J.A., Laurienti, P.J., Kraft, R.A., & Burdette, J.H. (2003). An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data sets. *Neuroimage*, 19(3), 1233–1239. doi:10.1016/S1053-8119(03)00169-1
- Malutina, S.A., Dragoy, O.V., Petrushevskiy, A.G., Fedina, O.N., Ivanova, M.V., Sevan, D.A., & Gutyrchik, E.F. (2012). Neurophysiological correlates of word frequency during naming task. In *International Symposium on Functional Neuroimaging: Basic Research and Clinical Applications* (pp. 83–85). MSUPE. (Russian). Retrieved from http://psyjournals.ru/neuroimag_2012/issue/53741.shtml.
- Meschyan, G., & Hernandez, A. (2002). Age of acquisition and word frequency: Determinants of object-naming speed and accuracy. *Memory & Cognition*, 30(2), 262–269. doi:10.3758/BF03195287
- Monti, M.M., Vanhaudenhuyse, A., Coleman, M.R., Boly, M., Pickard, J.D., Tshibanda, L., Owen, A.M., & Laureys, S. (2010). Willful modulation of brain activity in disorders of consciousness. *New England Journal of Medicine*, 362(7), 579–589. doi:10.1056/NEJMoa0905370
- Mori, E., Yamadori, A., & Mitani, Y. (1986). Left thalamic infarction and disturbance of verbal memory: A clinicoanatomical study with a new method of computed tomographic stereotaxic lesion localization. *Annals of Neurology*, 20(6), 671–676. doi:10.1002/ana.410200604
- Niendam, T.A., Laird, A.R., Ray, K.L., Dean, Y.M., Glahn, D.C., & Carter, C.S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241–268. doi:10.3758/s13415-011-0083-5
- Oldfield, R.C., & Wingfield, A. (1965). Response latencies in naming objects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17(4), 273–281. doi:10.1080/17470216508416445
- Owen, A.M., Coleman, M.R., Boly, M., Davis, M.H., Laureys, S., & Pickard, J.D. (2006). Detecting awareness in the vegetative state. *Science*, 313(5792), 1402–1402. doi:10.1126/science.1130197
- Palmer, E.D., Rosen, H.J., Ojemann, J.G., Buckner, R.L., Kelley, W.M., & Petersen, S.E. (2001). An event-related fMRI study of overt and covert word stem completion. *Neuroimage*, 14(1), 182–193. doi:10.1006/nimg.2001.0779
- Petersen, S.E., & Posner, M.I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150525
- Prabhakaran, R., Blumstein, S.E., Myers, E.B., Hutchison, E., & Britton, B. (2006). An event-related fMRI investigation of phonological-lexical competition. *Neuropsychologia*, 44(12), 2209–2221. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.025
- Price, C.J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *Neuroimage*, 62(2), 816–847. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.04.062
- Price, C.J., Devlin, J.T., Moore, C.J., Morton, C., & Laird, A.R. (2005). Meta-analyses of object naming: Effect of baseline. *Human Brain Mapping*, 25(1), 70–82. doi:10.1002/hbm.20132
- Segal, J.B., Williams, R., Kraut, M.A., & Hart, J. (2003). Semantic memory deficit with a left thalamic infarct. *Neurology*, 61(2), 252–254. doi:10.1212/01.WNL.0000073145.08816.E2
- Shafit, M.A., Burke, D.M., Stamatakis, E.A., Tam, P.P., & Tyler, L.K. (2007). On the tip-of-the-tongue: neural correlates of increased word-finding failures in normal aging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(12), 2060–2070. doi:10.1162/jocn.2007.19.12.2060
- Tyler, L.K., Bright, P., Fletcher, P., & Stamatakis, E.A. (2004). Neural processing of nouns and verbs: The role of inflectional morphology. *Neuropsychologia*, 42(4), 512–523. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.10.001
- Ullman, M.T. (2006). Is Broca's area part of a basal ganglia thalamocortical circuit?. *Cortex*, 42(4), 480–485. doi:10.1016/S0010-9452(08)70382-4
- Yarkoni, T., Barch, D.M., Gray, J.R., Conturo, T.E., & Braver, T.S. (2009). BOLD correlates of trial-by-trial reaction time variability in gray and white matter: a multi-study fMRI analysis. *PLoS One*, 4(1), e4257. doi:10.1371/journal.pone.0004257

Appendix

Brain structures within the cluster	Peak MNI coordinates			T statistics	K (cluster size)
	x	y	z		
L. Frontal Operculum Cortex	-34	32	6	6.44	3000
L. Frontal Pole	-38	36	-18	4.49	
L. Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis	-42	8	18	8.20	
L. Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis	-46	32	14	7.97	
L. Intracalcarine Cortex	-18	-68	6	4.58	
L. Lateral Occipital Cortex, inferior division	-38	-80	-2	13.13	
L. Lateral Occipital Cortex, superior division	-26	-64	50	7.93	
L. Lingual Gyrus	-4	-66	0	4.17	
L. Occipital Fusiform Gyrus	-38	-64	-10	11.12	
L. Postcentral Gyrus	-62	-12	26	5.06	
L. Precentral Gyrus	-42	0	54	9.96	
L. Middle Temporal Gyrus, temporooccipital part	-46	-56	2	8.56	
L. Parahippocampal Gyrus, anterior division	-26	-4	-18	4.33	
L. Supramarginal Gyrus, anterior division	-46	-40	46	6.38	
L. Temporal Fusiform Cortex, posterior division	-38	-20	-22	4.59	
L. Temporal Occipital Fusiform Cortex	-34	-56	-14	12.24	
L. Inferior Temporal Gyrus, temporooccipital part	-50	-56	-10	16.35	
R. Intracalcarine Cortex	10	-72	10	5.19	
R. Lateral Occipital Cortex, inferior division	42	-76	-14	10.48	
R. Lateral Occipital Cortex, superior division	34	-84	26	7.45	
R. Lateral Occipital Cortex, superior division	30	-72	26	6.38	
R. Lingual Gyrus	10	-72	-18	4.69	
R. Supracalcarine Cortex	2	-88	6	4.74	
R. Parahippocampal Gyrus, anterior division	34	-8	-22	5.44	
R. Parahippocampal Gyrus, posterior division	22	-28	-22	5.11	
R. Temporal Fusiform Cortex, posterior division	38	-16	-22	5.00	
R. Temporal Occipital Fusiform Cortex	34	-44	-18	12.78	
R. Inferior Temporal Gyrus, temporooccipital part	54	-56	-6	6.24	
L. Hippocampus	-30	-12	-14	7.49	
R. Hippocampus	34	-16	-14	5.59	
R. Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis	42	12	22	8.14	361
R. Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis	58	32	14	7.47	
R. Postcentral Gyrus	50	-12	58	5.48	
R. Frontal Operculum Cortex	46	16	6	5.08	
R. Middle Frontal Gyrus	54	12	42	4.89	
R. Frontal Pole	54	36	-2	4.55	
L. Juxtapositional Lobule Cortex (formerly Supplementary Motor Cortex)	-2	0	62	8.17	128
R. Paracingulate Gyrus	10	12	46	5.49	
R. Putamen	22	8	6	5.91	36

Table A1. Brain regions demonstrating significant activation in one-sided whole-brain t-contrast between the retrieval of the high frequency words and the perceptual control condition. *Note:* Cluster extent is given as voxel count after spatial normalization to MNI space with each voxel dimensions of 4×4×4 mm. Statistical significance: $p < .001$ uncorrected at voxel level, FDR-corrected at cluster level ($q = .05$, $FDR_c = 36$).

Brain structures within the cluster	Peak MNI coordinates			T statistics	K (cluster size)
	x	y	z		
L. Central Opercular Cortex	-46	-4	18	5.00	5879
L. Frontal Orbital Cortex	-34	28	-10	8.48	
L. Frontal Pole	-30	40	14	4.35	
L. Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis	-34	24	14	8.51	
L. Insular Cortex	-26	24	-2	9.57	
L. Intracalcarine Cortex	-14	-72	6	5.87	
L. Lateral Occipital Cortex, inferior division	-26	-88	6	10.58	
L. Lateral Occipital Cortex, superior division	-26	-68	34	7.73	
L. Lingual Gyrus	-6	-60	2	5.15	
L. Occipital Pole	-18	-96	10	11.42	
L. Postcentral Gyrus	-58	-20	42	6.13	
L. Precentral Gyrus	-46	-4	54	10.76	
L. Superior Parietal Lobule	-28	-50	52	7.74	
L. Supramarginal Gyrus, anterior division	-38	-36	38	7.22	
L. Temporal Fusiform Cortex, posterior division	-38	-20	-18	5.47	
L. Temporal Occipital Fusiform Cortex	-34	-56	-14	15.40	
R. Central Opercular Cortex	38	-4	22	6.13	
R. Cingulate Gyrus, posterior division	18	-48	2	4.02	
R. Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis	46	16	26	8.36	
R. Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis	58	32	14	8.40	
R. Insular Cortex	30	0	14	5.90	
R. Middle Frontal Gyrus	54	32	26	5.44	
R. Intracalcarine Cortex	14	-72	10	5.81	
R. Lateral Occipital Cortex, inferior division	42	-80	2	8.54	
R. Lateral Occipital Cortex, superior division	38	-80	22	9.02	
R. Lingual Gyrus	2	-72	-10	6.80	
R. Occipital Pole	28	-90	4	12.48	
R. Supracalcarine Cortex	2	-88	6	8.01	
R. Postcentral Gyrus	50	-12	58	5.21	
R. Precentral Gyrus	58	-8	46	7.71	
R. Superior Parietal Lobule	30	-52	50	6.29	
R. Temporal Occipital Fusiform Cortex	38	-48	-14	15.53	
R. Planum Polare	46	4	-14	5.02	
R. Temporal Pole	54	12	-6	5.02	
L. Hippocampus	-26	-32	-2	7.79	
L. Putamen	-22	16	6	9.73	
L. Thalamus	-14	-12	6	6.48	
R. Hippocampus	30	-8	-14	9.68	
R. Putamen	26	12	2	8.00	
R. Caudate Nucleus	22	20	10	7.61	
R. Thalamus	18	-12	6	7.08	
L. Cingulate Gyrus, anterior division	-6	8	26	6.42	420
L. Juxtapositional Lobule Cortex (formerly Supplementary Motor Cortex)	-6	4	62	10.83	
L. Paracingulate Gyrus	-6	12	46	8.54	
L. Superior Frontal Gyrus	-2	24	62	7.02	
R. Cingulate Gyrus, anterior division	6	4	30	6.93	
R. Paracingulate Gyrus	14	16	38	5.69	
R. Superior Frontal Gyrus	10	12	70	4.89	

Table A2. Brain regions demonstrating significant activation in one-sided whole-brain t-contrast between the retrieval of the low frequency words and the perceptual control condition. *Note:* Cluster extent is given as voxel count after spatial normalization to MNI space with each voxel dimensions of 4×4×4 mm. Statistical significance: $p < .001$ uncorrected at voxel level, FDR-corrected at cluster level ($q = .05$, $FDR_c = 36$).

■ экспериментальные сообщения ■

Мозговые корреляты частотности слов при назывании объектов по картинкам на материале русского языка

Роза Власова

Лаборатория нейролингвистики филологического факультета Высшей школы экономики;
Лечебно-реабилитационный центр Минздрава Российской Федерации, Москва, Россия

Валентин Сеницын

Лечебно-реабилитационный центр Минздрава Российской Федерации, Москва, Россия

Екатерина Печенкова

Институт практической психологии и психоанализа;
Лечебно-реабилитационный центр Минздрава Российской Федерации, Москва, Россия

Аннотация. Как правило, актуализация низкочастотных слов происходит медленнее, чем высокочастотных. Нейролингвистические исследования выявили ряд структур головного мозга, активация которых коррелирует с частотностью слова при его актуализации. На материале русского языка до сих пор было выполнено только одно фМРТ-исследование частотности слова (Малютина и др., 2012), результаты которого в значительной степени не согласуются с данными, полученными на материале других языков. Однако в работе на материале русского языка использовалась задача называния вслух действий, изображенных на рисунке (то есть актуализация глаголов), а для других языков использовались задания, направленные на актуализацию существительных. Для того чтобы выявить, какую природу имеют причины такой несогласованности результатов: методическую или кросс-лингвистическую, мы провели фМРТ-исследование мозговых коррелятов частотности слова на материале русского языка, используя задачу называния про себя предметов, изображенных на картинках. Мы обнаружили существенным образом сходный паттерн активации головного мозга при актуализации как низкочастотных, так и высокочастотных слов. Данный паттерн типичен для задачи называния предметов по рисункам и был ранее получен на многих языках. Более активными при актуализации низкочастотных слов по сравнению с высокочастотными оказались структуры мозга, связанные с речевыми процессами (нижняя лобная извилина билатерально, таламус и инсула в левом полушарии), зрительным восприятием (веретеновидная извилина, нижняя и средняя затылочные извилины билатерально) и когнитивным и моторным контролем (дополнительная моторная кора и поясная извилина в правом полушарии). Поясная извилина правого полушария оказалась единственной структурой, в которой по сравнению с контрольным условием наблюдалась активация при актуализации низкочастотных, но не высокочастотных слов. В то же время мы не обнаружили зон мозга, активировавшихся в большей степени при актуализации высокочастотных слов по сравнению с низкочастотными. Полученные результаты в целом хорошо согласуются с данными нейролингвистической литературы по английскому, немецкому и китайскому языкам, в связи с этим можно предположить, что отличия предыдущих данных, полученных на материале русского языка, связаны скорее со взаимодействием таких факторов, как часть речи (глагол или существительное), и частотность слова в мозговых механизмах актуализации слова, чем с кросс-лингвистическими различиями.

Контактная информация: Р. М. Власова, rosavlas@gmail.com; 105066 Москва, Старая Басманная улица 21/4, Лаборатория нейролингвистики НИУ ВШЭ.

Ключевые слова: частотность слова, эффект частотности слов, длина слова, название объектов, функциональная магнитно-резонансная томография, фМРТ, русский язык, часть речи, глагол, существительное

© 2015 Роза Власова, Валентин Сеницын, Екатерина Печенкова. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution"](#) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания авторов и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Благодарности. Мы благодарны Е.А. Мершиной за помощь в организации проведения исследования. Мы также признательны Р.И. Мачинской и В. Кемпе за внимание к нашей работе и конструктивные комментарии, которые помогли нам в значительной степени улучшить статью. В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 14-01-0051 в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014–2015 гг.

Статья поступила в редакцию 11 марта 2015 г. Принята в печать 28 марта 2015 г.

Литература

Ляшевская О. Н., Шаров С. А. Частотный словарь современного русского языка (на материале Национального корпуса русского языка). М.: Азбуковник, 2009.

Малютина С. А., Драгой О. В., Петрушевский А. Г., Федина О. Н., Иванова М. В., Козинцева Е. Г., Севан Д. А., Гутырчик Е. Ф. Нейрофизиологические корреляты частотности слова при его назывании // Международный симпозиум по нейроимиджингу: фундаментальные исследования и клиническая практика. М.: МГППУ, 2012. С. 83–85. URL: http://psyjournals.ru/neuroimag_2012/issue/53741.shtml

Alario F.-X., Chainay H., Lehericy S., Cohen L. The role of the supplementary motor area (SMA) in word production // *Brain Research*. 2006. Vol. 1076. No. 1. P. 129–143. doi:10.1016/j.brainres.2005.11.104

Annett M. A classification of hand preference by association analysis // *British Journal of Psychology*. 1970. Vol. 61. No. 3. P. 303–321. doi:10.1111/j.2044-8295.1970.tb01248.x

Balota D. A., Chumbley J. I. The locus of word-frequency effects in the pronunciation task: Lexical access and/or production? // *Journal of Memory and Language*. 1985. Vol. 24. No. 1. P. 89–106. doi:10.1016/0749-596X(85)90017-8

Binder J. R., Desai R. H., Graves W. W., Conant L. L. Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies // *Cerebral Cortex*. 2009. Vol. 19. No. 12. P. 2767–2796. doi:10.1093/cercor/bhp055

Bowyer S., Moran S., Seaman S., Young R., Sullivan J., Farjam R., Topley N., Hsieh L. Language processes during overt and covert speech in a simulated driving task // *Proceedings of the 16th International Conference on Biomagnetism*, Sapporo, Japan, Aug 2008. 2008. P. 25–29.

Brett M., Anton J.-L., Valabregue R., Poline J.-B. Region of interest analysis using the MarsBar toolbox for SPM 99 // *Neuroimage*. 2002. Vol. 16. No. 2. P. S497.

Chang C.-C., Lee Y. C., Lui C.-C., Lai S.-L. Right anterior cingulate cortex infarction and transient speech asponaneity // *Archives of Neurology*. 2007. Vol. 64. No. 3. P. 442–446. doi:10.1001/archneur.64.3.442

Chee M. W., Hon N. H., Caplan D., Lee H. L., Goh J. Frequency of concrete words modulates prefrontal activation during semantic judgments // *Neuroimage*. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 259–268. doi:10.1006/nimg.2002.1061

Chee M. W., Venkatraman V., Westphal C., Siong S. C. Comparison of block and event-related fMRI designs in evaluating the word-frequency effect // *Human Brain Mapping*. 2003. Vol. 18. No. 3. P. 186–193. doi:10.1002/hbm.10092

Chumbley J. R., Friston K. J. False discovery rate revisited: FDR and topological inference using Gaussian random fields // *Neuroimage*. 2009. Vol. 44. No. 1. P. 62–70. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.05.021

Crosson B., Sadek J. R., Bobholz J. A., Gökçay D., Mohr C. M., Leonard C. M., Maron L., Auerbach E. J., Browd S. R., Freeman A. J., Briggs R. W. Activity in the paracingulate and cingulate sulci during word generation: an fMRI study of functional anatomy // *Cerebral Cortex*. 1999. Vol. 9. No. 4. P. 307–316. doi:10.1093/cercor/9.4.307

DeLeon J., Gottesman R. F., Kleinman J. T., Newhart M., Davis C., Heidler-Gary J., Lee A., Hillis A. E. Neural regions essential for distinct cognitive processes underlying picture naming // *Brain*. 2007. Vol. 130. No. 5. P. 1408–1422. doi:10.1093/brain/awm011

Desikan R. S., Ségonne F., Fischl B., Quinn B. T., Dickerson B. C., Blacker D., Buckner R. L., Dale A. M., Maguire R. P., Hyman B. T., Alberti M. S., Killiany R. J. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest // *Neuroimage*. 2006. Vol. 31. No. 3. P. 968–980. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.01.021

Fadiga L., Craighero L., D'Ausilio A. Broca's area in language, action, and music // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2009. Vol. 1169. No. 1. P. 448–458. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04582.x

Falk D. The evolution of Broca's area // *IBRO History of Neuroscience*. 2007.

Fiebach C., Friederici A., Müller K., von Cramon D. fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2002. Vol. 14. No. 1. P. 11–23. doi:10.1162/089892902317205285

Fiez J. A., Balota D. A., Raichle M. E., Petersen S. E. Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading // *Neuron*. 1999. Vol. 24. No. 1. P. 205–218. doi:10.1016/S0896-6273(00)80833-8

Friston K. J., Holmes A. P., Worsley K. J., Poline J.-P., Frith C. D., Frackowiak R. S. Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach // *Human Brain Mapping*. 1994. Vol. 2. No. 4. P. 189–210. doi:10.1002/hbm.460010306

Gahl S. Time and thyme are not homophones: The effect of lemma frequency on word durations in spontaneous speech // *Language*. 2008. Vol. 84. No. 3. P. 474–496.

Gardner M. K., Rothkopf E., Lapan R., Lafferty T. The word frequency effect in lexical decision: Finding a frequency-based component // *Memory & Cognition*. 1987. Vol. 15. No. 1. P. 24–28. doi:10.3758/BF03197709

Gracco V. L., Tremblay P., Pike B. Imaging speech production using fMRI // *Neuroimage*. 2005. Vol. 26. No. 1. P. 294–301. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.01.033

Graves W. W., Grabowski T. J., Mehta S., Gordon J. K. A neural signature of phonological access: distinguishing the effects of word frequency from familiarity and length in overt picture naming // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2007. Vol. 19. No. 4. P. 617–631. doi:10.1162/jocn.2007.19.4.617

Grinband J., Wager T. D., Lindquist M., Ferrera V. P., Hirsch J. Detection of time-varying signals in event-related fMRI designs // *Neuroimage*. 2008. Vol. 43. No. 3. P. 509–520. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.07.065

Jescheniak J. D., Levelt W. J. Word frequency effects in speech production: Retrieval of syntactic information and of phonological form // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 1994. Vol. 20. No. 4. P. 824–843. doi:10.1037/0278-7393.20.4.824

Kan I. P., Thompson-Schill S. L. Effect of name agreement on prefrontal activity during overt and covert picture naming // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2004. Vol. 4. No. 1. P. 43–57. doi:10.3758/CABN.4.1.43

Kang S. Neural basis of the word frequency effect and its relation to lexical processing 2012.

Keller T.A., Carpenter P.A., Just M.A. The neural bases of sentence comprehension: a fMRI examination of syntactic and lexical processing // *Cerebral Cortex*. 2001. Vol. 11. No. 3. P. 223–237. doi:10.1093/cercor/11.3.223

Khushu S., Kumaran S., Tripathi R., Gupta A., Jain P., Jain V. Functional magnetic resonance imaging of the primary motor cortex in humans: response to increased functional demands // *Journal of Biosciences*. 2001. Vol. 26. No. 2. P. 205–215. doi:10.1007/BF02703644

Kleiner M., Brainard D., Pelli D., Ingling A., Murray R., Broussard C. What's new in Psychtoolbox-3 // *Perception*. 2007. Vol. 36. No. 14. P. 1.

Kuo W.-J., Yeh T.-C., Lee C.-Y., Wu Y.-T., Chou C.-C., Ho L.-T., Hung D.L., Tzeng O.J., Hsieh J.-C. Frequency effects of Chinese character processing in the brain: an event-related fMRI study // *Neuroimage*. 2003. Vol. 18. No. 3. P. 720–730. doi:10.1016/S1053-8119(03)00015-6

Lee C.-Y., Tsai J.-L., Kuo W.-J., Yeh T.-C., Wu Y.-T., Ho L.-T., Hung D.L., Tzeng O.J., Hsieh J.-C. Neuronal correlates of consistency and frequency effects on Chinese character naming: an event-related fMRI study // *Neuroimage*. 2004. Vol. 23. No. 4. P. 1235–1245. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.07.064

Liljeström M., Tarkiainen A., Parviainen T., Kujala J., Numminen J., Hiltunen J., Laine M., Salmelin R. Perceiving and naming actions and objects // *Neuroimage*. 2008. Vol. 41. No. 3. P. 1132–1141. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.03.016

Liu H.-L., Liao W.-T., Fang S.-Y., Chu T.-C., Tan L.H. Correlation between temporal response of fMRI and fast reaction time in a language task // *Magnetic Resonance Imaging*. 2004. Vol. 22. No. 4. P. 451–455. doi:10.1016/j.mri.2004.01.003

Maldjian J.A., Laurienti P.J., Kraft R.A., Burdette J.H. An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data sets // *Neuroimage*. 2003. Vol. 19. No. 3. P. 1233–1239. doi:10.1016/S1053-8119(03)00169-1

Meschyan G., Hernandez A. Age of acquisition and word frequency: Determinants of object-naming speed and accuracy // *Memory & Cognition*. 2002. Vol. 30. No. 2. P. 262–269. doi:10.3758/BF03195287

Monti M.M., Vanhaudenhuyse A., Coleman M.R., Boly M., Pickard J.D., Tshibanda L., Owen A.M., Laureys S. Willful modulation of brain activity in disorders of consciousness // *New England Journal of Medicine*. 2010. Vol. 362. No. 7. P. 579–589. doi:10.1056/NEJMoa0905370

Mori E., Yamadori A., Mitani Y. Left thalamic infarction and disturbance of verbal memory: A clinicoanatomical study with a new method of computed tomographic stereotaxic lesion localization // *Annals of Neurology*. 1986. Vol. 20. No. 6. P. 671–676. doi:10.1002/ana.410200604

Niendam T.A., Laird A.R., Ray K.L., Dean Y.M., Glahn D.C., Carter C.S. Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2012. Vol. 12. No. 2. P. 241–268. doi:10.3758/s13415-011-0083-5

Oldfield R.C., Wingfield A. Response latencies in naming objects // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 1965. Vol. 17. No. 4. P. 273–281. doi:10.1080/17470216508416445

Owen A.M., Coleman M.R., Boly M., Davis M.H., Laureys S., Pickard J.D. Detecting awareness in the vegetative state // *Science*. 2006. Vol. 313. No. 5792. P. 1402–1402. doi:10.1126/science.1130197

Palmer E.D., Rosen H.J., Ojemann J.G., Buckner R.L., Kelley W.M., Petersen S.E. An event-related fMRI study of overt and covert word stem completion // *Neuroimage*. 2001. Vol. 14. No. 1. P. 182–193. doi:10.1006/nimg.2001.0779

Petersen S.E., Posner M.I. The attention system of the human brain: 20 years after // *Annual Review of Neuroscience*. 2012. Vol. 35. P. 73–89. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150525

Prabhakaran R., Blumstein S.E., Myers E.B., Hutchison E., Britton B. An event-related fMRI investigation of phonological-lexical competition // *Neuropsychologia*. 2006. Vol. 44. No. 12. P. 2209–2221. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.025

Price C.J. A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading // *Neuroimage*. 2012. Vol. 62. No. 2. P. 816–847. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.04.062

Price C.J., Devlin J.T., Moore C.J., Morton C., Laird A.R. Meta-analyses of object naming: Effect of baseline // *Human Brain Mapping*. 2005. Vol. 25. No. 1. P. 70–82. doi:10.1002/hbm.20132

Segal J.B., Williams R., Kraut M.A., Hart J. Semantic memory deficit with a left thalamic infarct // *Neurology*. 2003. Vol. 61. No. 2. P. 252–254. doi:10.1212/01.WNL.0000073145.08816.E2

Shafto M.A., Burke D.M., Stamatakis E.A., Tam P.P., Tyler L.K. On the tip-of-the-tongue: neural correlates of increased word-finding failures in normal aging // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2007. Vol. 19. No. 12. P. 2060–2070. doi:10.1162/jocn.2007.19.12.2060

Tyler L.K., Bright P., Fletcher P., Stamatakis E.A. Neural processing of nouns and verbs: The role of inflectional morphology // *Neuropsychologia*. 2004. Vol. 42. No. 4. P. 512–523. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.10.001

Ullman M.T. Is Broca's area part of a basal ganglia thalamocortical circuit? // *Cortex*. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 480–485. doi:10.1016/S0010-9452(08)70382-4

Yarkoni T., Barch D.M., Gray J.R., Conturo T.E., Braver T.S. BOLD correlates of trial-by-trial reaction time variability in gray and white matter: a multi-study fMRI analysis // *PLoS One*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. e4257. doi:10.1371/journal.pone.0004257

МЕТОДЫ

Линейные модели со смешанными эффектами в когнитивных исследованиях

Андрей Анатольевич Четвериков

Лаборатория когнитивных исследований ИОН РАНХИГС, Москва;
факультет психологии СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Анализ данных в когнитивных исследованиях всегда сопряжен с определенными трудностями: отсутствие полностью сбалансированного дизайна, невозможность подобрать полностью эквивалентные стимулы, пропущенные значения в ответах и т. д. Для контроля случайной ошибки чаще всего применяется усреднение данных по испытуемым либо стимулам, а после этого усредненные данные анализируются с помощью традиционных методов, таких как дисперсионный анализ. В статье рассматривается альтернативный подход, основанный на применении регрессионных моделей со смешанными эффектами. Этот вид моделей позволяет анализировать данные без усреднения, включая в модель в явном виде допущения о существующих между отдельными наблюдениями взаимосвязях. В качестве примера анализа используются результаты квазиэксперимента, в котором оценивается связь времени ответа в задаче узнавания с правильностью ответа, полом испытуемого и полом человека на предъявленной фотографии. Сравнение результатов анализа с помощью смешанных моделей и различных вариантов дисперсионного анализа (с усреднением по стимулам, по испытуемым и без усреднения) показывает схожесть результатов смешанных моделей с результатами дисперсионного анализа по испытуемым и результатами дисперсионного анализа по наблюдениям. Однако в случае смешанных моделей интерпретация результатов становится более обоснованной, так как и различия между стимулами, и различия между испытуемыми включены в модель. В заключении рассматриваются преимущества смешанных моделей и даются рекомендации по выбору случайных эффектов для включения в модель.

Контактная информация: Четвериков Андрей Анатольевич, a.chetverikov@psy.spbu.ru; факультет психологии СПбГУ, наб. Макарова, д. 6, 199034 Санкт-Петербург, Россия.

Ключевые слова: смешанные модели, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, время реакции, квазиэксперимент, ошибки

© 2015 Четвериков Андрей Анатольевич. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution"](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья частично основана на материалах более ранней публикации в сборнике материалов I Международной научной конференции «Формирование основных направлений развития современной статистики и эконометрики»: Четвериков А. А. Опыт применения смешанных регрессионных моделей для анализа квазиэкспериментальных данных // Материалы I Международной научной конференции «Формирование основных направлений развития современной статистики и эконометрики» / Под ред. В. Н. Афанасьева. Оренбург: ООО ИПУ «Университет», 2013. Т. 1. С. 332–338.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (#15-06-07417 А) и СПбГУ (НИР #8.38.287.2014).

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2015 г. Принята в печать 21 марта 2015 г.

Введение

В психологическом эксперименте основным объектом интереса являются различия в значении зависимой переменной между уровнями одной или нескольких независимых переменных. Все остальное — температура в помещении, время суток, индивидуальные различия испытуемых, свойства стимулов и множество других факторов — считаются «шумом» или случайной ошибкой, влияния которой экспериментатор старается избежать всеми доступными способами. Для этого испытуемые случайным образом распределяются между группами, стимулы — между условиями, испытуемые изолируются от внешних факторов в лаборатории, применяется специальное оборудование, увеличивается количество наблюдений или опытов, а также используются другие методические приемы, хорошо известные любому исследователю. После сбора данных наступает пора их анализа. В идеальной ситуации перед исследователем предстает прекрасная картина сбалансированного дизайна, в котором отсутствуют пропущенные значения, количество измерений для каждой комбинации испытуемого и независимых переменных достаточно велико и все измерения проводились в одних и тех же условиях.

В реальности, разумеется, ситуация отличается. Появляются пропущенные значения, например, часто из анализа исключаются ошибочные ответы испытуемого, выясняется, что из-за усталости и научения испытуемого количество наблюдений достаточно ограничено, на предполагавшиеся одинаковыми стимулы испытуемые дают разные реакции и т.д. Хуже всего дело обстоит в тех случаях, когда какие-либо переменные оказываются неподконтрольными экспериментатору. Например, пытаюсь изучить связь между частотой употребления слова и вероятностью его опознания при краткосрочном предъявлении, исследователь может сколь угодно долго выравнивать группы часто и редко употребляемых слов по всем характеристикам, однако в результате перед ним все равно окажутся разные группы слов. Профессиональная область интересов автора связана с изучением ошибок и эмоциональных реакций, и, как можно предположить, и то, и другое в достаточно слабой степени может контролироваться экспериментатором.

Подобные ситуации возникают наиболее часто в квазиэкспериментальных исследованиях, однако и в других видах исследований может быть полезно учесть влияние переменных, которые невозможно контролировать. Например, данные в сбалансированном психофизическом эксперименте будут тем не менее подвержены влиянию научения и усталости, то есть будут влиять порядковый номер пробы. Психологи, проводящие исследования в школах, могут захотеть учесть различия между испытуемыми, набранными в разных классах или разных школах. Физиологические данные, собираемые в лонгитюдных исследованиях, могут различаться в зависимости от времени суток и т.д.

Классическим методом для контроля ошибки в ситуациях, когда невозможно отделить независимую переменную от испытуемого (иногда подобные переменные также называют субъектными) или стимула,

являются тесты для двух связанных выборок и дисперсионный анализ (ANOVA) с повторными измерениями. Однако у анализа с повторными измерениями есть некоторые недостатки. Во-первых, часто оказывается неочевидным, что нужно выбрать в качестве единицы анализа. Например, при анализе реакций испытуемого на разные стимулы в зависимости от экспериментальных условий можно использовать в качестве единицы анализа как стимул, так и испытуемого. Чаще всего в таких ситуациях предлагается проводить анализ после усреднения реакций «по стимулам» или «по испытуемым». Однако при усреднении будет потеряна часть данных. Более того, у нас нет никаких оснований для того, чтобы выбрать из этих двух вариантов более оптимальный. По этой причине в психолингвистических исследованиях рекомендуется приводить результаты обоих вариантов анализа и рассчитывать на их основе критерий $\min F'$: $\min F' = (F1 + F2) / (F1 * F2)$, где $F1$ и $F2$ относятся к результатам анализа по испытуемым и по стимулам соответственно (Clark, 1973; Raaijmakers et al., 1999; Raaijmakers, 2003).

Смешанные линейные модели

Возможной альтернативой дисперсионному анализу с повторными измерениями является регрессионный анализ с использованием смешанных линейных моделей. Сущность данного метода заключается в следующем. Предполагается, что эффекты (факторы), оказывающие влияние на зависимую переменную, можно условно разделить на два типа: фиксированные и случайные. Хотя по поводу философских и методологических аспектов разделения эффектов на фиксированные и случайные идут споры (Gelman, 2005; r-sig-mixed-models FAQ–GLMM, 2015), в данной работе я буду рассматривать как случайные те эффекты, которые случайным образом варьируются в исследовании и не отражают все возможные значения фактора в генеральной совокупности. Фиксированные эффекты, с другой стороны, — это то, что обычно является предметом интереса исследователя, то есть те независимые переменные, уровни которых он устанавливает или контролирует. С практической точки зрения необходимо также учитывать, что для оценки случайных эффектов необходимо, чтобы количество уровней соответствующего фактора было относительно велико — 5–6 уровней минимум (r-sig-mixed-models FAQ–GLMM, 2015).

По сути смешанные модели — это расширение регрессионных моделей. Обычная линейная регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$y_i = \mu + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i — значение зависимой переменной для i -го наблюдения, μ — константа, β_k — значение коэффициента для k -го фактора, x_{ki} — значение k -го фактора для i -го наблюдения, ε_i — значение остатка для i -го наблюдения.

Возьмем для примера простой эксперимент с задачами лексического решения, где время ответа измеряется в зависимости от типа стимула (слово – не слово) и количества букв в стимуле. Тогда y_i будут обозначать время ответа в каждой пробе, β_1 — различие по времени ответа между словом и не словом, x_{1i} — тип стимула в данной пробе, β_2 — изменение времени ответа при увеличении длины слова на одну букву, x_{2i} — длину слова в данной пробе, ε_i — отличие времени ответа, предсказанного на основе модели, от реального.

В случае смешанных моделей уравнение меняется следующим образом:

$$y_{ij} = \mu + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{kji} + \sum_{m=1}^q b_{mj} z_{mji} + \varepsilon_{ji} \quad (2).$$

В отличие от β , коэффициентов для фиксированных эффектов, которые одинаковы для всех наблюдений, коэффициенты для случайных эффектов, b , определены для j -й группы наблюдений, а z_{mji} задает значение случайного эффекта для данной группы и данного наблюдения. Продолжая пример, допустим, каждая группа наблюдений — отдельный испытуемый и случайный эффект для каждого испытуемого только один — константа. Тогда b_j — среднее¹ отклонение времени ответа для данного испытуемого от общегруппового среднего, а z_{ji} — идентификатор испытуемого.

Группой наблюдений может являться не только испытуемый, но и стимул, или и то, и другое. Другими словами, можно предположить, например, что каждому испытуемому или стимулу соответствует свое время ответа, то есть наличие случайного свободного члена в уравнении регрессии. Кроме того, можно также предположить, что время правильных и неправильных ответов у разных испытуемых различается или различается время ответа на мужские лица в сравнении с женскими, то есть предположить случайный эффект наклона прямой регрессии для каких-либо внутригрупповых факторов. В случае более сложных дизайнов исследования испытуемые сами могут быть объединены в какие-то большие группы, например, школы или больницы, и тогда в уравнение регрессии добавляется еще один уровень.

Основное требование к данным в случае смешанных моделей — наличие групп взаимосвязанных наблюдений. В дополнение к этому смешанные линейные модели требуют тех же допущений, что и обычные линейные модели:

1. Эффекты в модели аддитивны, то есть влияние одного предиктора не зависит от уровня другого предиктора. Если это требование нарушается, необходимо преобразование переменных или включение в модель взаимодействий.

2. Линейная взаимосвязь между независимыми и зависимой переменной. Случаи нелинейной связи также можно анализировать, преобразовав переменные или включив в модель полином $(x + x^2 + x^3 + \dots)$.

3. Ошибки (остатки) имеют равную дисперсию и распределены нормально. Это наименее важные из ограничений, практически никогда не соблюдаемые на практике, и их нарушения обычно не приводят к существенным проблемам (Gelman, Hill, 2007).

Независимость ошибок, существенная для обычных линейных моделей, в случае смешанных моделей не обязательна (Pinheiro, Bates, 2000). Более того, отдельные статистические пакеты, например, *nlme* (Sarkar et al., 2008), позволяют легко задавать структуру взаимосвязей ошибок в явном виде, хотя эта тема выходит за пределы данной статьи.

Кроме того, число наблюдений должно быть не меньше числа уровней случайных эффектов в модели для того, чтобы анализ с помощью смешанных моделей стал возможен хотя бы теоретически. Например, если речь идет об испытуемых как случайном эффекте и в модели также присутствует случайный эффект для взаимодействия испытуемого и какого-либо еще фактора, то число наблюдений должно быть не меньше, чем число испытуемых, умноженное на число уровней фактора. Проводя аналогию с классическими тестами, провести тест Стьюдента для двух связанных выборок невозможно, если число наблюдений для каждого испытуемого меньше двух. Однако это лишь ограничение на применимость метода: осмысленность и надежность полученных результатов будет тем выше, чем больше наблюдений анализируется.

Как и для других регрессионных моделей, для смешанных моделей предикторами могут выступать как количественные (включая ранговые), так и категориальные переменные. Зависимая переменная также может измеряться в различных шкалах при условии, что для нее указано соответствующее распределение. Отдельно стоит отметить, что для биномиальных данных (в том числе точности ответов) использование смешанных биномиальных моделей приводит к более точным оценкам, чем дисперсионный анализ (Jaeger, 2008). Для ранговых переменных можно использовать порядковую регрессию со смешанными эффектами, например, с помощью пакета *DPPackage* (Jara et al., 2011), хотя во многих случаях вполне оправданным будет применение обычных смешанных моделей.

Благодаря подобным возможностям смешанные модели в последние годы начинают использоваться в различных областях: в психолингвистике (Mousikou et al., 2015), в исследованиях восприятия и внимания (Kristjánsson, Jóhannesson, 2014; Laubrock et al., 2008; Королькова, 2014), в работах по проблеме сознания (Sandberg et al., 2010), в социальной психологии (Biesanz, Human, 2010; Wright et al., 2010), в мета-анализе (Bakker, Wicherts, 2011), в исследованиях памяти (Oberauer, Kliegl, 2006; Wright, London, 2009), клинической психологии (Baldwin et al., 2009), психофизиологии (Gulbinaite et al., 2014; Wu, Clark, 2014) и т. д.

Сложность применяемых моделей также разнится. Например, Сэндберг и коллеги (Sandberg et al., 2010) сравнивали различные шкалы осознанности, используя внутригрупповой дизайн и контролируя избыточную дисперсию между испытуемыми через включение в модель случайного эффекта для испытуемых. Мусику и коллеги (Mousikou et al., 2015) исследовали влияние

¹ Корректнее было бы говорить о предсказанном среднем отклонении времени ответа испытуемого, но для краткости здесь и далее — среднее.

прайминга в задаче лексического решения и включали в модель случайные эффекты для испытуемого, стимула и типа прайма с группировкой по стимулу. Четвериков (Chetverikov, 2014) использовал смешанную модель для контроля вариативности стимулов и индивидуальных различий между испытуемыми в задаче оценки привлекательности лиц. Применяются и более сложные модели. Например, в работе Болдуина и коллег (Baldwin et al., 2009) рассматривалась эффективность психотерапии с включением случайного эффекта пациента, линейного и квадратичного эффектов количества психотерапевтических сессий с группировкой по пациенту, эффекта психотерапевта и линейного эффекта количества сессий с группировкой по психотерапевту.

При этом количество статей с использованием смешанных моделей постоянно увеличивается. На момент написания этой статьи Google Scholar по запросу «“mixed effects model” psychology» выдавал 1150 результатов за 2012 год, 1440 — за 2013 год, и 1890 — за 2014. Далеко не все авторы упоминают применяемый метод именно с формулировкой “mixed effects model”, поэтому реальное число статей с использованием смешанных моделей еще выше.

В оставшейся части статьи я описываю различия в подходах и результатах обработки квазиэкспериментальных данных с помощью дисперсионного анализа и смешанных регрессионных моделей на примере реального исследования.

Анализ времени ответа в квазиэксперименте

Дисперсионный анализ с усреднением по испытуемым/стимулам

Рассмотрим следующий квазиэксперимент. Использовалась задача узнавания: испытуемому на краткий промежуток времени предъявляется фотография лица, затем через какое-то время эта фотография предъявляется вместе с другой, новой, и испытуемого просят выбрать фотографию, которую он уже видел ранее. Исследователя интересует, как соотносится между собой время правильных и неправильных ответов. Правильность ответа испытуемого невозможно задать экспериментально, не влияя на другие параметры задачи. Например, можно сделать так, что будут только неправильные ответы, сделав задачу практически нерешаемой, но это будет уже фактически другая задача. Поэтому в данном случае речь идет о классическом квазиэксперименте: независимая переменная «правильность ответа» не контролируется экспериментатором. Кроме того, ему необходимо учитывать фактор пола испытуемого и пола человека на фотографии (фактор, далее обозначаемый как тип стимула), так как есть предположение, что данные факторы могут мешать корректной оценке эффекта правильности ответа в генеральной совокупности.

Есть несколько возможных вариантов проведения дисперсионного анализа: анализ «по испытуемым», «по стимулам» и «по наблюдениям». В первом случае рассчитывается среднее для каждого испытуемого

по каждому типу стимула, во втором случае, наоборот, рассчитывается среднее для каждого стимула по каждому типу испытуемых. Эти виды анализа особенно проблематичны в случаях, подобных рассматриваемому, поскольку распределение стимулов по правильным и неправильным ответам не является случайным, а определяется сочетанием свойств испытуемого и стимула. Наконец, в третьем случае можно отказаться от анализа с повторными измерениями в пользу обычного дисперсионного анализа в надежде, что избыточная дисперсия будет скомпенсирована увеличением количества измерений за счет отсутствия усреднения.

Для данной статьи я использовал данные эксперимента, цель которого не заключалась в анализе эффекта правильности ответов, но который тем не менее позволяет провести подобный анализ. В рамках данного эксперимента по описанной выше процедуре испытуемые ($N = 60$) выполняли 43 пробы каждый. Всего использовалось 86 стимулов, для каждого испытуемого 43 из них выбирались случайным образом. Таким образом, набор данных состоял из 2580 наблюдений (данные доступны для анализа в онлайн-приложении к статье).

На рисунке 1 приведены медианы времен ответов в зависимости от пола испытуемого, типа стимула и правильности ответа. Как видно из данного графика, распределение ответов достаточно сильно отличается от равномерного. Мужских фотографий предъявлялось больше, чем женских (это связано с соотношением числа мужских и женских фотографий в использовавшейся базе стимулов), правильных ответов заметно больше, чем неправильных. В результате у испытуемых номер 5, 6, 16, 19, 24, 28 практически нет неправильных ответов при предъявлении женских фотографий. Анализ распределения времен правильных и неправильных ответов в целом по группе (правая часть графика) позволяет предположить, что будет выражен эффект правильности ответа и, возможно, типа стимула.

Попробуем сначала провести дисперсионный анализ с усреднением данных «по испытуемым» и «по стимулам». Анализ проводился в системе статистических вычислений R (R Core Team, 2014) с применением суммы квадратов типа II и контрастов с нулевой суммой (*sum-to-zero*). Результаты анализа приведены в таблице 1. Здесь и далее переменные обозначены следующим образом: пол испытуемого — *Subject Gender*, тип стимула — *Stimulus Gender*, правильность ответа — *Accuracy*. Взаимодействия переменных обозначены через «×». Статистически значимыми оказались эффекты правильности ответа и взаимодействия правильности ответа и типа стимула. Кроме того, на уровне тенденции проявился основной эффект типа стимула. При попытке провести анализ «по стимулам» оказалась, что для 6 из 86 стимулов не хватает данных, т.е. для них не представлены те или иные комбинации пола испытуемого и правильности ответа. Результаты анализа по оставшимся стимулам представлены в таблице 1. Как можно заметить, они сильно отличаются от анализа «по испытуемым» — значимыми остались только эффекты типа стимула и правильности ответа.

Далее я использовал третий подход — дисперсионный анализ «по наблюдениям», без усреднения. Хотя при использовании этого подхода отсутствует потеря

	По испытуемым		По стимулам		По наблюдениям		Смешанная модель
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>p</i>
Accuracy	60.29	<.001	53.15	<.001	80.75	<.001	<.001
Subj. Gender	0.23	.636	0.12	.729	0.01	.904	.644
Stim. Gender	3.84	.055	7.64	.007	8.30	.004	.011
Accuracy × Subj. Gender	5.32	.025	2.28	.135	5.52	.019	.026
Accuracy × Stim. Gender	4.77	.033	0.77	.382	4.60	.032	.018
Subj. Gender × Stim. Gender	0.76	.387	1.66	.201	2.37	.124	.292
Accuracy × Stim. Type × Subj. Gender	0.23	.632	0.01	.928	1.25	.263	
Residual DF	58		78		2572		

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа и анализа с применением смешанной модели.

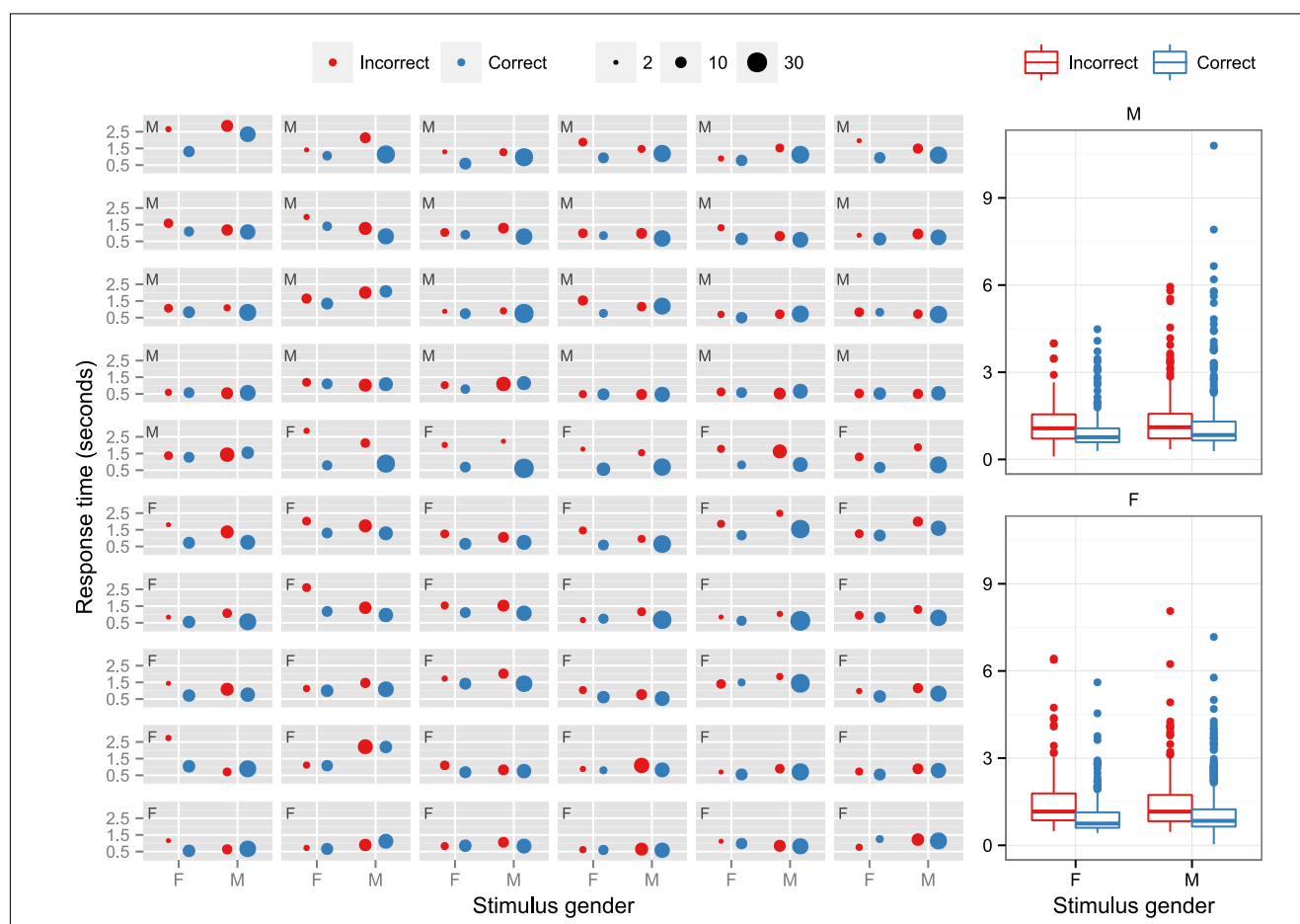


Рисунок 1. Медианы времен правильных и неправильных ответов (в секундах) по испытуемым (слева) и в целом по выборке (справа). Индексы F и M под графиком означают женские и мужские лица соответственно. Индексы F и M над графиками справа и в углах графиков слева означают пол испытуемых. Красным цветом отображены неправильные ответы, синим — правильные. Площадь кругов на графиках слева отражает количество наблюдений. На графиках справа верхняя и нижняя граница «ящика» показывает первый и третий квартили, верхняя и нижняя граница вертикальных линий — \pm полтора межквартильного расстояния, точки — выбросы, выходящие за \pm полтора межквартильного расстояния.

данных вследствие усреднения, возникает опасность того, что результаты будут искажены из-за несбалансированности данных. Например, низкая средняя точность и скорость ответов нескольких отдельно взятых испытуемых может привести к тому, что будет проявляться снижение скорости неправильных ответов по всей выборке. Кроме того, не учитывается взаимосвязь результатов каждого испытуемого, то есть нарушается допущение дисперсионного анализа о независимости измерений. Как видно из таблицы 1, результаты

дисперсионного анализа сырых данных согласуются с результатами анализа «по испытуемым», но не согласуются с результатами анализа «по стимулам».

Смешанные линейные модели

В смешанную регрессионную модель были включены шесть фиксированных эффектов: пол испытуемого, тип стимула, правильности ответа и их взаимодействия второго уровня. Кроме того, в модель были включены четыре случайных эффекта: (1) испытуе-

Случайный эффект в lme4	Формальная интерпретация	Пример содержательной интерпретации в исследовании
$(1 z)$	случайное значение среднего для группы z	испытуемые различаются по времени ответа
$(x z) = (1+x z)$	случайное значение константы для группы z , случайное значение угла наклона x внутри группы z , которые могут зависеть друг от друга	испытуемые различаются по времени ответа, по-разному реагируют на x , и эти два эффекта могут быть взаимосвязаны
$(0+x z) = (-1+x z)$	только случайное значение угла наклона x внутри группы z , средние не различаются	испытуемые в среднем не различаются по времени ответа, но могут по-разному реагировать на x
$(1 z) + (0+x z) = (x z)$	случайное значение константы для группы z , случайное значение угла наклона x внутри группы z , не зависящие друг от друга	испытуемые различаются по времени ответа, по-разному реагируют на x , но эти два эффекта являются независимыми
$(1 z/block) = (1 z)+(1 z:block)$	случайное значение среднего для группы z , которое может меняться между блоками $block$ внутри группы z (вложенные случайные эффекты)	испытуемые различаются по времени ответа, причем для каждого испытуемого среднее может варьироваться между блоками (или стимулами, если каждый стимул повторяется по несколько раз)
$(x site/block) = (x site)+(x site:block) = (1+x site)+(1+x site:block)$	случайное значение среднего и угла наклона x для групп z , которое может меняться между блоками $block$	испытуемые различаются по среднему времени ответа и времени ответа на x , причем для каждого испытуемого среднее и эффект x могут по-разному варьироваться между блоками, возможна взаимосвязь между ними
$(1 z1)+(1 z2)$	случайное значение среднего для групп $z1$ и групп $z2$	испытуемые и стимулы различаются по времени ответа, эти эффекты не взаимосвязаны
$(x z1)+(x z2) = (1+x z1)+(1+x z2)$	случайное значение среднего и угла наклона x для групп $z1$ и $z2$, внутри каждой группы среднее и угол наклона могут зависеть друг от друга	испытуемые различаются по времени ответа, по-разному реагируют на x , и эти два эффекта могут быть взаимосвязаны; стимулы также различаются по времени ответа на них в среднем и в зависимости от x , эти эффекты также могут быть взаимосвязаны

Таблица 2. Примеры описания случайных эффектов в пакете *lme4*.

Group	Variable 1	Variable 2	Std. Dev.	Correlation
Stimulus	(Intercept)		0.04	
Subject	(Intercept)		0.43	
	Accuracy		0.16	
	Stim. Type		0.18	
Subject	(Intercept)	Accuracy		-.86
	(Intercept)	Stim. Type		.33
	Accuracy	Stim. Type		.11
Residual			0.74	

Таблица 3. Анализ смешанной модели, случайные эффекты.

	χ^2	df	p
Accuracy x Subject	11.64	3	.009
Stim. Type x Subject	17.41	3	<.001
Stimulus	0.18	1	.671

Таблица 4. Анализ необходимости включения случайных эффектов в модель. Примечание: χ^2 — значение статистики χ^2 для теста отношения правдоподобия при сравнении моделей с включением случайного эффекта и без него, df — разница в степенях свободы между моделями.

			LRT		Parametric bootstrap	Kenward– Roger	
	<i>B</i>	<i>SE</i>	χ^2	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Accuracy	−0.30	0.07	39.51	<.001	<.001	53.94	<.001
Subj. Gender	0.17	0.13	0.18	.672	.644	0.17	.677
Stim. Type	0.04	0.08	6.61	.010	.011	6.93	.011
Accuracy × Subj. Gender	−0.17	0.08	4.84	.028	.026	4.81	.032
Accuracy × Stim. Type	0.16	0.07	5.66	.017	.018	5.59	.018
Subj. Gender × Stim. Type	−0.08	0.08	1.11	.292	.292	1.08	.304

Таблица 5. Анализ смешанной модели, фиксированные эффекты. Примечание: B — регрессионный коэффициент, SE — стандартная ошибка коэффициента, LRT — тест отношения правдоподобия, *Parametric Bootstrap* — оценка p с помощью параметрического бутстрэпа, *Kenward-Roger* — расчет степеней свободы по методу Кенварда и Роджера.

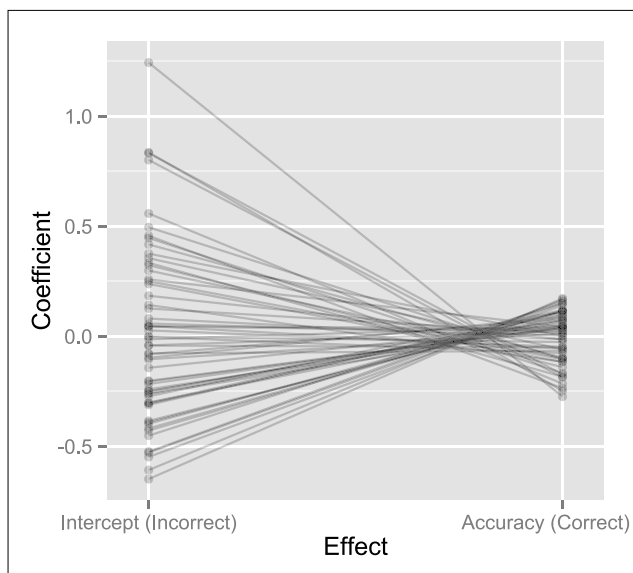


Рисунок 2. Взаимосвязь коэффициентов случайных эффектов по испытуемым. *Intercept* — константа в использованном уравнении регрессии — отражает отклонение времени неправильных ответов испытуемого от среднего времени неправильных ответов, *Accuracy* — случайный эффект для правильности ответа — отражает отклонение разницы между правильными и неправильными ответами испытуемого по времени от средней разницы.

мого; (2) случайного угла наклона для правильности ответа по испытуемым; (3) стимула; (4) случайного угла наклона для пола испытуемого по стимулам.

Данная модель предполагает, что испытуемые отличаются по среднему времени ответа и могут по-разному реагировать на стимулы разного пола и что время ответа на конкретные стимулы также отличается и может быть различным в зависимости от пола испытуемого. Я не включал в модель взаимодействие третьего уровня, так как все три предшествующих анализа показали, что оно не значимо, а его исключение упрощает расчеты модели.

Для проведения анализа была использована библиотека *lme4* (Bates et al., 2014). В R существует несколько альтернативных библиотек для анализа смешанных моделей, однако наиболее легкой в использовании представляется именно эта. Современные версии других программ для статистических расчетов, таких как STATA, SAS и SPSS, также включают в себя команды для регрессионного анализа со смешанными моделями (краткое сравнение статистических пакетов для смешанных моделей можно найти здесь: GLMM package comparison, 2015; r-sig-mixed-models FAQ – GLMM, 2015).

В *lme4*, как и во многих других пакетах в R, для задания модели используется синтаксис в виде «формулы», схожей с регрессионным уравнением. Например, для модели, включающей фиксированный эффект для x , фиксированный эффект для z и случайный эффект для x и среднего с группировкой по испытуемым, формула будет выглядеть как $y \sim x + z + (x | Subject)$. Здесь видно, что зависимая переменная отделяется от предикторов тильдой, предикторы разделяются знаком плюс, а группировка случайных эффектов задается в скобках с вертикальной чертой, отделяющей группирующую переменную. Случайные и фиксиро-

ванные эффекты для среднего (*Intercept*) предполагаются по умолчанию, поэтому в явном виде их указывать необязательно. В таблице 2 представлены примеры формул для записи некоторых часто встречающихся вариантов случайных эффектов в *lme4*.

Смешанная модель (*Akaike information criterion*, $AIC = 5999$) в целом лучше описывала данные, чем простой дисперсионный анализ без усреднения ($AIC = 6500$). Сначала рассмотрим данные о случайных эффектах. В таблице 3 в первом столбце представлены данные о «группах» случайных эффектов. В полученной модели случайные эффекты разбиты на две группы: к первой группе (*Stimulus*) относится только эффект стимула, ко второй (*Subject*) — эффект испытуемого и эффекты разного угла наклона прямой регрессии по испытуемым для правильных и неправильных ответов (*Accuracy*) и стимулов разного типа (*Stimulus Type*). В данной модели были применены уровневые (*treatment*) контрасты. В четвертом и пятом столбцах показаны стандартные отклонения и корреляции между случайными эффектами. Доля изменчивости по испытуемым (.43) значительно выше, чем по стимулам (.04). Это означает, что время ответа в значительно большей степени варьируется между испытуемыми, нежели между стимулами.

Кроме того, существует высокая негативная корреляция (–.86) между случайным эффектом испытуемого (*Intercept*) и случайным эффектом для правильности ответа по испытуемым (*Accuracy*). В то же время взаимосвязь случайного эффекта испытуемого и случайного эффекта типа стимула по испытуемым низкая (.33). Поскольку используются уровневые контрасты, то случайный эффект *Intercept* в данной модели отражает сдвиг времени ответа испытуемого относительно группового среднего при условии, что ответ неправильный ($Accuracy = 0$) и предъявлена фотография женщины ($Stimulus Type = F$). Это затрудняет непосредственный анализ обнаруженной негативной корреляции.

Для того чтобы прояснить ее природу, был проведен повторный анализ с исключением случайного эффекта взаимодействия испытуемого и типа стимула. Корреляция эффектов *Intercept* и *Accuracy* осталась высокой (–.76). Поскольку в модели осталось всего два случайных эффекта для испытуемого, можно говорить о том, что время неправильных ответов негативно взаимосвязано с различием времени правильных и неправильных ответов. Иначе говоря, если неправильные ответы испытуемого медленнее неправильных ответов по группе (значение *Intercept* будет соответственно выше), то разница по времени правильных и неправильных ответов будет меньше. Эта взаимосвязь отражена на рисунке 2.

Применение смешанных моделей позволяет узнать, насколько необходимо добавление случайного эффекта, путем сравнения моделей с включенным и исключенным случайным эффектом. В таблице 4 представлены результаты такого сравнения для случайных эффектов угла наклона прямой регрессии по испытуемым и эффекта стимула. Удаление эффекта стимула не приводит к значимым различиям в объяснительной силе модели, в отличие от эффектов угла наклона. Это неудивительно, учитывая низкие значения диспер-

сии эффекта стимула (таблица 3). Поэтому данный эффект можно было бы исключить из дальнейшего анализа, но поскольку эффекты для включения в модель выбирались исходя из теоретических соображений, дальнейший анализ также проводился с включением случайного эффекта стимула.

Значения фиксированных эффектов для итоговой модели представлены в таблице 5. В библиотеке *lme4* не реализован расчет p -уровней для моделей с гауссовым распределением зависимой переменной, что обусловлено теоретической неоднозначностью расчетов числа степеней свободы (Bates, 2006). Тем не менее существуют возможные пути решения данной проблемы, в частности:

1. Сравнение моделей на основе отношения правдоподобия (*likelihood ratio test*, LRT).
2. Оценка значимости с расчетом степеней свободы с использованием аппроксимации по методу Кенварда-Роджера, реализованная в библиотеке *pbrktest* (Halekoh, Højsgaard, 2014).
3. Параметрические методы бутстрепа, также реализованные в библиотеке *pbrktest*.
4. Оценка значимости с расчетом степеней свободы с использованием аппроксимации по методу Саттертуэйта, реализованная в библиотеке *lmerTest* для проверки гипотез с использованием суммы квадратов типа III (Kuznetsova et al., 2014).

LRT обычно считается менее надежным подходом, чем аппроксимация по методу Саттертуэйта, которая в свою очередь менее надежна, чем метод Кенварда-Роджера или параметрический бутстреп (*r-sig-mixed-models FAQ–GLMM*, 2015).

Я использовал три первых метода. Сравнение моделей производилось по аналогии с вычислением суммы квадратов типа II в дисперсионном анализе. Все методы расчета p -уровня показали практически идентичные результаты.

Таким образом, результат применения смешанных моделей оказался близок к результатам дисперсионного анализа «по испытуемым» и результатам анализа сырых данных, что говорит о надежности данного метода.

Заключение

Когда есть вероятность влияния различий между стимулами или между испытуемыми на полученные эффекты, для анализа данных можно применить несколько подходов. Дисперсионный анализ «по стимулам» позволяет учесть различия между стимулами, однако не учитываются различия между испытуемыми. Анализ «по испытуемым» позволяет учесть различия между испытуемыми, но теряются различия между стимулами. При этом в обоих случаях используется предварительное усреднение данных, что потенциально может приводить к потерям в мощности анализа. Дисперсионный анализ сырых данных не имеет проблем с потерей мощности в результате усреднения, но и не учитывает наличия связанных групп наблюдений. Смешанные модели позволяют учесть оба типа различий. Это не делает квазиэксперимент экспери-

ментом, но снижает вероятность получения результатов, искаженных за счет различий между стимулами или различий между испытуемыми. Кроме того, даже в обычном эксперименте это позволит проконтролировать возможное влияние побочных переменных.

Проведенное сравнение методов на материале квазиэксперимента с измерением времени ответа показывает, что результаты анализа с помощью смешанных линейных моделей в целом согласуются с результатами дисперсионного анализа с усреднением по испытуемым. Однако у смешанных моделей есть ряд преимуществ. В частности, они позволяют проверить предположение о необходимости учета тех или иных случайных факторов (в рассмотренном случае фактор стимула оказался излишним) и получить данные о взаимосвязях между случайными факторами, что позволило показать негативную корреляцию между отклонением времени неправильных ответов испытуемого от среднего времени неправильных ответов и отклонением от среднего разницы по времени между правильными и неправильными ответами. Чем медленнее ошибочные ответы испытуемых, тем меньше различие по времени правильных и неправильных ответов, то есть тем слабее эффект замедления на ошибочных ответах. Кроме того, поскольку в смешанных моделях в явном виде учитываются возможные источники искажения в данных, это позволяет заранее отвергнуть критику, связанную с этими источниками, возможную в случае дисперсионного анализа сырых данных. Таким образом, в описанном случае смешанная модель не показывает различий с дисперсионным анализом в результатах статистических тестов для отдельных факторов, однако позволяет с большей уверенностью делать выводы о результатах исследования. Кроме того, необходимо помнить, что априорных оснований предпочитать анализ «по стимулам» анализу «по испытуемым» нет, хотя мы с тем же успехом могли получить ситуацию, когда бы сильное влияние оказывал фактор стимула, а не фактор испытуемого. В этом случае анализ «по испытуемым» дал бы ошибочные результаты. Исходя из этого, использование смешанных моделей с точки зрения автора оказывается вполне целесообразным — в худшем случае они покажут те же результаты, что и дисперсионный анализ, а в лучшем позволят избежать грубых ошибок.

Применение смешанной регрессии оставляет исследователю значительно больше свободы в выборе эффектов для включения в модель. При этом в случае простых моделей, где случайные эффекты сгруппированы только по одной переменной (например, по испытуемым), рекомендуется включать в случайные эффекты все те переменные, которые используются среди фиксированных эффектов и для которых есть повторные измерения. Например, если речь идет об обычном внутригрупповом плане 2×2 , то обе независимые переменные и их взаимодействие должны быть включены в модель как в качестве фиксированных, так и в качестве случайных эффектов с группировкой по испытуемым. В противном случае увеличивается вероятность ложнопозитивных результатов (Barr et al., 2013). Однако когда речь идет о более сложных моделях, то возникает ряд затруднений. При увеличении числа случай-

ных эффектов растет время расчетов и вероятность проблем подгонки моделей. Рекомендация автора — исходить из теоретических представлений о том, какие факторы будут оказывать влияние, и использовать один и тот же подход для всей серии исследований. Может возникнуть впечатление, что подобные рекомендации оставляют слишком большой простор для манипуляций. Однако нужно помнить, что проблема выбора модели характерна не только для регрессии со смешанными эффектами. Например, дисперсионный анализ также позволяет включать в модель дополнительные предикторы (например, пол испытуемого, возраст, среднее время ответа, номер пробы и т. д.). Регрессионный подход всего лишь делает эту проблему явной, вынуждая исследователя задумываться о предпосылках, лежащих в основе его действий. Наконец, один статистический результат сам по себе не подтверждает и не опровергает теоретическую гипотезу. Только серия исследований может позволить сделать это, а в таком случае модель, произвольно подогнанная ради получения заветной значимости в одном исследовании, вряд ли покажет тот же результат в другом исследовании.

Литература

- Королькова О. А. Перцептивное пространство и предикторы различения эмоциональных экспрессий лица // Российский журнал когнитивной науки. 2014. Т. 1. № 4. С. 82–97. URL: <http://cogjournal.org/1/4/pdf/KorolkovaRJCS2014b.pdf>.
- Bakker M., Wicherts J. M. The (mis)reporting of statistical results in psychology journals // Behavior Research Methods. 2011. Vol. 43. No. 3. P. 666–678. doi:10.3758/s13428-011-0089-5
- Baldwin S. A., Berkelson A., Atkins D. C., Olsen J. A., Nielsen S. L. Rates of change in naturalistic psychotherapy: Contrasting dose-effect and good-enough level models of change // Journal of Consulting and Clinical Psychology. 2009. Vol. 77. No. 2. P. 203–211. doi:10.1037/a0015235
- Barr D. J., Levy R., Scheepers C., Tily H. J. Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal // Journal of Memory and Language. 2013. Vol. 68. No. 3. P. 255–278. doi:10.1016/j.jml.2012.11.001
- Bates D. [R] lmer, p-values and all that // R-help mailing list. 2006. URL: <https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/2006-May/094765.html>.
- Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4 2014. URL: <http://cran.r-project.org/package=lme4>
- Biesanz J. C., Human L. J. The cost of forming more accurate impressions: accuracy-motivated perceivers see the personality of others more distinctively but less normatively than perceivers without an explicit goal // Psychological Science. 2010. Vol. 21. No. 4. P. 589–594. doi:10.1177/0956797610364121
- Chetverikov A. Warmth of familiarity and chill of error: Affective consequences of recognition decisions // Cognition & Emotion. 2014. Vol. 28. No. 3. P. 385–415. doi:10.1080/02699931.2013.833085
- Clark H. H. The language-as-fixed-effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research // Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior. 1973. Vol. 12. P. 335–359. doi:10.1016/S0022-5371(73)80014-3
- Gelman A. Analysis of variance: Why it is more important than ever // The Annals of Statistics. 2005. Vol. 33. No. 1. P. 1–53. doi:10.1214/009053604000001048
- Gelman A., Hill J. Data analysis using regression and multi-level/hierarchical models. New York, USA: Cambridge Univ Press, 2007.
- GLMM package comparison 2015. URL: <http://glmm.wikidot.com/pkg-comparison>
- Gulbinaite R., Johnson A., de Jong R., Morey C. C., van Rijn H. Dissociable mechanisms underlying individual differences in visual working memory capacity // NeuroImage. 2014. Vol. 99. P. 197–206. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.05.060
- Halekoh U., Højsgaard S. A Kenward-Roger approximation and parametric bootstrap methods for tests in linear mixed models – The R package pbrtest // Journal of Statistical Software. 2014. Vol. 59. No. 9. P. 1–30. URL: <http://www.jstatsoft.org/v59/i09/>
- Jaeger T. F. Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards Logit Mixed Models // Journal of Memory and Language. 2008. Vol. 59. No. 4. P. 434–446. doi:10.1016/j.jml.2007.11.007
- Jara A., Hanson T., Quintana F., Müller P., Rosner G. DPPackage: Bayesian semi- and nonparametric modeling in R // Journal of Statistical Software. 2011. Vol. 40. No. 5. P. 1–30. URL: <http://www.jstatsoft.org/v40/i05/>.
- Kristjánsson Árnir Jóhannesson Ó. I. How priming in visual search affects response time distributions: Analyses with ex-Gaussian fits // Attention, Perception & Psychophysics. 2014. Vol. 76. No. 8. P. 2199–2211. doi:10.3758/s13414-014-0735-y
- Kuznetsova A., Brockhoff P. B., Christensen R. H. B. lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models 2014. URL: <http://cran.r-project.org/package=lmerTest>.
- Laubrock J., Engbert R., Kliegl R. Fixational eye movements predict the perceived direction of ambiguous apparent motion // Journal of Vision. 2008. Vol. 8. No. 14. P. 13.1–13.17. doi:10.1167/8.14.13
- Mousikou P., Kinoshita S., Wu S., Norris D. Transposed-letter priming effects in reading aloud words and nonwords // Psychonomic Bulletin & Review. 2015. Vol. Online first. P. 1–6. doi:10.3758/s13423-015-0806-7
- Oberauer K., Kliegl R. A formal model of capacity limits in working memory // Journal of Memory and Language. 2006. Vol. 55. P. 601–626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- Pinheiro J. C., Bates D. M. Mixed effects models in S and S-Plus. New York: Springer Verlag, 2000. doi:10.1198/tech.2001.s574
- R Core Team R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2014. URL: <http://www.r-project.org/>.
- Raaijmakers J. G. W. A further look at the “language-as-fixed-effect fallacy” // Canadian Journal of Experimental Psychology. 2003. Vol. 57. No. 3. P. 141–151. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14596473>
- Raaijmakers J. G. W., Schrijnemakers J. M. C., Gremmen F. How to deal with “the language-as-fixed-effect fallacy”: Common misconceptions and alternative solutions // Journal of Memory and Language. 1999. Vol. 41. No. 3. P. 416–426.
- r-sig-mixed-models FAQ–GLMM 2015. URL: <http://glmm.wikidot.com/faq>
- Sandberg K., Timmermans B., Overgaard M., Cleeremans A. Measuring consciousness: is one measure better than the other? // Consciousness and Cognition. 2010. Vol. 19. No. 4. P. 1069–1078. doi:10.1016/j.concog.2009.12.013
- Sarkar D., DebRoy S., Bates D., Pinheiro J., the R Core team nlme: Linear and nonlinear mixed effects models // R package version 3.1-90. R package version 3.1-90, 2008.
- Wright D. B., London K. Multilevel modelling: Beyond the basic applications // The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. 2009. Vol. 62. No. Pt 2. P. 439–456. doi:10.1348/000711008X327632
- Wright D. B., London K., Waechter M. Social anxiety moderates memory conformity in adolescents // Applied Cognitive Psychology. 2010. Vol. 24. No. 7. P. 1034–1045. doi:10.1002/acp
- Wu Y., Clark L. Disappointment and regret enhance corrugator reactivity in a gambling task // Psychophysiology. 2014. Vol. 52. No. 4. P. 518–523. doi:10.1111/psyp.12371

methods

Linear Mixed Effects Regression in Cognitive Studies

Andrey Chetverikov

Cognitive Research Lab, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow; Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Data from cognitive studies can be difficult to analyze. Often, there is a lack of balanced design, omnipresent differences in stimuli or missing data cells. To control for the erroneous variance, researchers frequently aggregate the data by participant or by stimulus, and then analyze the averaged data using conventionally selected methods such as ANOVA. The present paper describes an alternative approach that utilizes linear mixed-effects regression (LMER). This approach does not involve data aggregation and its accompanying loss of statistical power. Instead, it provides researchers with an opportunity to incorporate assumptions about data covariance into the model. To demonstrate the benefits of this approach, I use data from a quasi-experimental study with response accuracy, participants' gender, and the gender of a recognized face as predictors of response times in a face recognition task. LMER results are compared to the results of ANOVA with aggregation by participant and by stimulus, and without aggregation. LMER results were similar to ANOVA with aggregation by participant and to ANOVA based on raw data. However, LMER allows researchers to make more solid conclusions since possible sources of error — differences between stimuli and between participants — are controlled within the regression model. The implications of using LMER for data analysis and some practical issues related to it are discussed.

Correspondence: Andrey A. Chetverikov, a.chetverikov@psy.spbu.ru; Department of Psychology, St. Petersburg State University, 6 Makarova nab., 199034 St. Petersburg, Russia

Keywords: mixed models, regression, ANOVA, response times, quasi-experiment, errors

Copyright © 2015. Andrey A. Chetverikov. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Note. The article is partially based on an earlier paper in the conference proceedings volume: Chetverikov, A. A. (2013). [Application of the linear mixed models for the analysis of the quasi-experimental data]. In V. N. Afanasyev (Ed.) Proceedings of the 1st International Scientific Conference [“Formation of the main directions of development in contemporary statistics and econometrics”]. Vol. 1. (pp. 332–338). Orenburg: Universitet.

Acknowledgments. The research is supported by the Russian foundation for basic research (project # 15-06-07417 A) and Saint Petersburg State University (research project #8.38.287.2014).

Received 18 February 2015, accepted 21 March 2015.

References

- Bakker, M., & Wicherts, J. M. (2011). The (mis)reporting of statistical results in psychology journals. *Behavior Research Methods*, 43 (3), 666–678. doi:10.3758/s13428-011-0089-5
- Baldwin, S. A., Berkeljon, A., Atkins, D. C., Olsen, J. A., & Nielsen, S. L. (2009). Rates of change in naturalistic psychotherapy: Contrasting dose-effect and good-enough level models of change. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 77 (2), 203–211. doi:10.1037/a0015235
- Barr, D. J., Levy, R., Scheepers, C., & Tily, H. J. (2013). Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal. *Journal of Memory and Language*, 68 (3), 255–278. doi:10.1016/j.jml.2012.11.001
- Bates, D. (2006). [R] lmer, p-values and all that. *R-help mailing list*. Retrieved January 18, 2015 from <https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/2006-May/094765.html>
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=lme4>
- Biesanz, J. C., & Human, L. J. (2010). The cost of forming more accurate impressions: accuracy-motivated perceivers see the personality of others more distinctively but less normatively than perceivers without an explicit goal. *Psychological Science*, 21 (4), 589–594. doi:10.1177/0956797610364121
- Chetverikov, A. (2014). Warmth of familiarity and chill of error: Affective consequences of recognition decisions. *Cognition & Emotion*, 28 (3), 385–415. doi:10.1080/02699931.2013.833085

- Clark, H.H. (1973). The language-as-fixed-effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 335–359. doi:10.1016/S0022-5371(73)80014-3
- Gelman, A. (2005). Analysis of variance: Why it is more important than ever. *The Annals of Statistics*, 33 (1), 1–53. doi:10.1214/009053604000001048
- Gelman, A., & Hill, J. (2007). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. New York, USA: Cambridge Univ Press.
- GLMM package comparison (2015). Retrieved March 01, 2015 from <http://glmm.wikidot.com/pkg-comparison>
- Gulbinaite, R., Johnson, A., de Jong, R., Morey, C.C., & van Rijn, H. (2014). Dissociable mechanisms underlying individual differences in visual working memory capacity. *NeuroImage*, 99, 197–206. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.05.060
- Halekoh, U., & Højsgaard, S. (2014). A Kenward-Roger approximation and parametric bootstrap methods for tests in linear mixed models — The R package pbrtest. *Journal of Statistical Software*, 59 (9), 1–30. Retrieved from <http://www.jstatsoft.org/v59/i09/>
- Jaeger, T.F. (2008). Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards Logit Mixed Models. *Journal of Memory and Language*, 59 (4), 434–446. doi:10.1016/j.jml.2007.11.007
- Jara, A., Hanson, T., Quintana, F., Müller, P., & Rosner, G. (2011). DPpackage: Bayesian semi- and nonparametric modeling in R. *Journal of Statistical Software*, 40 (5), 1–30. Retrieved from <http://www.jstatsoft.org/v40/i05/>
- Korolkova, O.A. (2014). Perceptual space and predictors of emotional facial expression discrimination. *The Russian Journal of Cognitive Science*, 1 (4), 82–97. Retrieved from <http://cog-journal.org/1/4/pdf/KorolkovaRJCS2014b.pdf>
- Kristjánsson Árne, & Jóhannesson, Ó.I. (2014). How priming in visual search affects response time distributions: Analyses with ex-Gaussian fits. *Attention, Perception & Psychophysics*, 76 (8), 2199–2211. doi:10.3758/s13414-014-0735-y
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., & Christensen, R.H.B. (2014). lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models. Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=lmerTest>
- Laubrock, J., Engbert, R., & Kliegl, R. (2008). Fixational eye movements predict the perceived direction of ambiguous apparent motion. *Journal of Vision*, 8 (14), 13.1–13.17. doi:10.1167/8.14.13
- Mousikou, P., Kinoshita, S., Wu, S., & Norris, D. (2015). Transposed-letter priming effects in reading aloud words and nonwords. *Psychonomic Bulletin & Review*, Online first, 1–6. doi:10.3758/s13423-015-0806-7
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55, 601–626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- Pinheiro, J.C., & Bates, D.M. (2000). *Mixed effects models in S and S-Plus*. New York: Springer Verlag. doi:10.1198/tech.2001.s574
- R Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Raaijmakers, J.G.W. (2003). A further look at the “language-as-fixed-effect fallacy”. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 57 (3), 141–151. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14596473>
- Raaijmakers, J.G.W., Schrijnemakers, J.M.C., & Gremmen, F. (1999). How to deal with “the language-as-fixed-effect fallacy”: Common misconceptions and alternative solutions. *Journal of Memory and Language*, 41 (3), 416–426.
- r-sig-mixed-models FAQ–GLMM (2015). Retrieved January 18, 2015 from <http://glmm.wikidot.com/faq>
- Sandberg, K., Timmermans, B., Overgaard, M., & Cleeremans, A. (2010). Measuring consciousness: is one measure better than the other? *Consciousness and Cognition*, 19 (4), 1069–1078. doi:10.1016/j.concog.2009.12.013
- Sarkar, D., DebRoy, S., Bates, D., Pinheiro, J., & the R Core team (2008). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. *R package version 3.1-90*
- Wright, D.B., & London, K. (2009). Multilevel modelling: Beyond the basic applications. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 62 (Pt 2), 439–456. doi:10.1348/000711008X327632
- Wright, D.B., London, K., & Waechter, M. (2010). Social anxiety moderates memory conformity in adolescents. *Applied Cognitive Psychology*, 24 (7), 1034–1045. doi:10.1002/acp.1604
- Wu, Y., & Clark, L. (2014). Disappointment and regret enhance corrugator reactivity in a gambling task. *Psychophysiology*, 52 (4), 518–523. doi:10.1111/psyp.12371

ДИСКУССИЯ

Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия

Алексей Крушинский

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Аннотация. 40 лет назад Л. В. Крушинским была опубликована дискуссионная статья «О возможном механизме рассудка», в которой он предположил, что упорядоченность мозга и избыточность нейронов должны быть тем выше, чем сложнее когнитивные задачи, решаемые животным. Анализ термодинамической и биофизической литературы свидетельствует о том, что у этой мысли есть определенные физические предпосылки, разбору которых я посвящаю эту статью. Основываясь на положениях Э. Шредингера, Л. Больцмана, Л. Бриллюэна, К. Шеннона и др., можно показать, что за решение логической задачи надо заплатить увеличением энтропии мозга, то есть снижением его упорядоченности, превышающем информацию, содержащуюся в задаче. Поэтому если мозг не обладает некоторым запасом упорядоченности, он просто не сможет решить задачу. Биофизический вывод о том, что мозг обладает запасом упорядоченности, превосходящим информационную сложность решаемых им задач, позволяет сделать предположения о возможной роли этого явления в биологической эволюции нервной системы.

Контактная информация: dyakonova.varvara@gmail.com; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119992 Москва; Воробьевы горы.

Ключевые слова: эволюция когнитивных функций, мышление, решение задачи, информация, энтропия, экстраполяция

© 2015, Алексей Крушинский. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution"](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Текст статьи основывается на предыдущей публикации в сборнике: Крушинский А. Л. Биофизические аспекты рассудочной деятельности // Формирование поведения животных в норме и патологии. К 100-летию со дня рождения Л. В. Крушинского (1911–1984) / Под ред. И. И. Полетаевой, З. А. Зориной. сс. 424–436. М.: Языки славянской культуры, 2013. После замечаний рецензентов исправления в статью внесены В. Е. Дьяконовой.

Благодарности. Выражаю благодарность В. Е. Дьяконовой за помощь при подготовке рукописи и С. Б. Розанову за ценные комментарии. Работа поддержана РФФИ 14-04-00537, 13-04-00747 и 12-04-00360.

Статья поступила в редакцию 30 июля 2014 г. Принята в печать 18 марта 2015 г.

*Памяти Леонида Викторовича
Крушинского 1911–1984*

Беспорядок неотделим от «творчества», поскольку это последнее характеризуется определенным «порядком».

Поль Валери

Концепция элементарной рассудочной деятельности Л.В. Крушинского является одной из составляющих общей теории поведения. Наиболее полное развитие эта концепция получила в книге «Биологические основы рассудочной деятельности» (Крушинский Л.В., 1977, 1986). Экспериментально доказав наличие элементарного разума у животных, он показал адаптивное значение этой функции мозга и ее роль в процессе эволюции высших позвоночных животных и человека.

Как ученого Леонида Викторовича прежде всего характеризовала глубокая культура и широта научных интересов. Значительное влияние на развитие его научных взглядов оказали идеи крупнейших физиков Э. Шредингера и Н. Бора о возможности применения физических законов к биологическим системам, а также работы выдающегося математика А.А. Ляпунова, с которым его связывала многолетняя дружба. Поздний период творчества Л.В. Крушинского характеризуется стремлением к максимально возможной точности и дискретности в описании тех физиологических механизмов, которые лежат в основе поведения животных. Так, гипотеза о возможных механизмах элементарной рассудочной деятельности (Крушинский Л.В., 1974, 2013; Крушинский А.Л., 2013; Полетаева, 2013) в значительной степени определяет возможность описания некоторых ее положений¹ с использованием точных соотношений термодинамики и теории информации. Целью моей работы было подробнее развить именно эти аспекты работы Л.В. Крушинского на основе ставших уже классическими положениях Э. Шредингера, Л. Больцмана, Л. Бриллюэна, К. Шеннона и др.

Согласно гипотезе Л.В. Крушинского (1974), в основе разумного поведения лежит возможность решения животными новых для них задач, построенных на простейших понятиях о пространстве и движении. Одним из наиболее существенных звеньев гипотезы является положение о том, что необходимым условием для решения новых задач является избыточное количество нейронов в мозге. Используется общепринятое представление об избыточности как о наличии большего количества нейронов, чем то, которое могло бы обеспечить нормальное функционирование организма. К выводу о наличии избыточности в мозге пришли на основании данных о том, что ряд патологических процессов у человека, сопровождающихся гибелью огромного числа нейронов, может протекать бессимптомно (например, Davie, 2008). «Избыточность» нейронов обнаружена и в простых нервных системах беспозвоночных, например (Zecević et al., 1989), что не противоречит предположению о связи избыточности с решением новых задач. Теория самоорганизующихся адаптивных систем предполагает, что

¹ В исходной публикации Л.В. Крушинского гипотеза сформулирована в виде пяти положений (Прим. ред.).

способность снижать неопределенность внешней среды должна быть вообще присуща биологическим организмам (Friston, 2010).

Сопоставление успеха решения логических задач с нейронной организацией конечного мозга у позвоночных показало, что чем больше размер мозга, то есть количество нейронов, из которых он состоит, и чем сложнее и совершеннее система соединений между ними, тем больше вероятность того, что животное обладает развитой способностью к элементарному мышлению. Экспериментальные данные (Попова и др., 1983; Перепелкина и др., 2006) хорошо согласуются с положением о роли избыточности нейронов для осуществления разумного поведения. Ссылаясь на Э. Шредингера (1947), Л.В. Крушинский предположил, что для восприятия структурной организации среды процессы, происходящие в мозге, должны быть упорядоченными, причем эта упорядоченность тем выше, чем большее число нейронов вовлечено в процесс мышления. В последнее время вопрос о том, что следует понимать под «высокой упорядоченностью мозга» активно дискутируется (Huang, 2008; Friston, 2010; Carhart-Harris et al., 2014). Среди конкретных факторов, которые следует учитывать при оценке сложности и упорядоченности, называются: количество нейронов, межнейронных связей (близких и далеких), дендритных шипиков, число и эффективность синапсов, разнообразие рецепторов и сигнальных молекул и т.д. (например, Bargmann, 2012; Toga, 2012; Сахаров, 2012).

Оба предположения Л.В. Крушинского: об избыточности нейронов и о том, что для восприятия структурной организации среды процессы, происходящие в мозге, должны быть упорядоченными, — можно рассмотреть более детально с биофизической точки зрения. Ссылки на хорошо известные положения, которые можно найти в учебных пособиях по биофизике, статистической физике и оригинальных исследованиях по термодинамике неравновесных систем (Блюменфельд, 1974; Волькенштейн, 1975, 1980, 2008; Васильев, 1980; Рубин, 1987; Хакен, 1991; Пригожин, Стенгерс, 2000) не привожу.

Согласно современным представлениям, биологические системы можно определить как открытые², далекие от равновесия, устойчивые системы, способные к размножению (Волькенштейн, 1975; Зотин А.И., Зотин А.А., 1999). Э. Шредингер в своей книге «Что такое жизнь с точки зрения физики» (1947), впервые вышедшей в 1944 году, достаточно четко показал возможность описания живых систем при помощи таких физических величин, как энергия и энтропия.

В физических изолированных системах³, согласно второму закону термодинамики, энтропия (S) всегда растет, то есть

$$\Delta S \geq 0 \quad (1),$$

² Открытые системы — системы, которые обмениваются энергией и массой (веществом) с окружающей средой.

³ Изолированные системы полностью изолированы, т.е. не обмениваются с окружающей средой энергией и массой.

достигая максимума в состоянии равновесия. Энтропия физической системы описывается уравнением Больцмана:

$$S = k \ln W \quad (2),$$

где W — термодинамическая вероятность, которая характеризует число микросостояний системы, соответствующих данному макросостоянию; k — постоянная Больцмана, $k=1.38 \cdot 10^{-16}$ эрг·град⁻¹ или $3.31 \cdot 10^{-24}$ энтропийных единиц (э. е.). Макросостояние физической системы определяется такими параметрами, как объем, давление, температура, химический состав и т.п. Согласно Э. Шредингеру, W является мерой неупорядоченности системы, обратная величина $1/W$ может рассматриваться как мера упорядоченности. Таким образом, уравнение Больцмана можно написать так:

$$-S = k \ln 1/W \quad (3).$$

Величина $-S$ есть мера упорядоченности системы.

Одной из основных идей Шредингера является положение о высокой упорядоченности живых организмов. В процессе жизнедеятельности организм непрерывно увеличивает свою энтропию, приближаясь к состоянию максимальной энтропии, которое является смертью. Он может поддерживать высокую упорядоченность (низкую энтропию), используя свободную энергию⁴, содержащуюся в пище, и увеличивая энтропию окружающей среды. Согласно Шредингеру, физические взаимодействия между живым организмом и внешней средой должны обладать известной степенью упорядоченности, то есть подчиняться строгим физическим законам. Такое условие может выполняться только в системах, состоящих из большого количества атомов⁵. Реальные расчеты оценки упорядоченности достаточно сложны и основаны на приближительных расчетах количества информации, содержащейся в живом организме⁶.

⁴ Свободная энергия (F) — та часть энергии системы, которая может быть использована для совершения работы: $F=U-TS$, где U — полная энергия, T — абсолютная температура, S — энтропия.

⁵ Упорядоченность организма, состоящего из небольшого числа атомов, уничтожалась бы из-за тепловых флуктуаций (Шредингер, 1947; Волькенштейн, 1975).

⁶ Приблизительная оценка количества информации, содержащаяся в организме человека, была определена Блюменфельдом (1974), и, согласно его расчетам, приблизительно равна $1.3 \cdot 10^{26}$ бит или 300 кал/град (300 э. е.). На основе этой оценки Блюменфельд заключает, что возникновение и усложнение биологической организации происходит практически «бесплатно» и с легкостью компенсируется тривиальными физическими и химическими процессами. По мнению других ученых, такая оценка значительно занижена (Волькенштейн, 2008). Расчеты Блюменфельда дают достаточно логичную оценку структурной информации, необходимой для построения условного организма, состоящего из соизмеримого с человеческим организмом количества клеток. Однако даже если говорить о структурной информации, эта оценка значительно занижена, поскольку не учитывает информацию, содержащуюся в тонкой организации мозга человека. Кроме того, расчеты Блюменфельда не учитывают той информации, которая необходима для описания сложных процессов метаболизма, которые реализуются в живом организме. Таким образом, точная количественная оценка упорядоченности биологической системы достаточно сложна и неоднозначна. Однако высказанное Шредингером положение о высокой упорядоченности мозга, по-видимому, справедливо.

Работа Шредингера оказала значительное влияние на развитие современной биофизики и термодинамики неравновесных систем. Следует отметить, что, хотя в целом положение Шредингера о высокой упорядоченности живых организмов разделяется многими учеными (Волькенштейн, 1975, 2008; Зотин А.И., Зотин А.А., 1999; Тринчер, 1965; Кастлер, 1967; Шмальгаузен, 1968; Ленинджер, 1985; Грин, 2000), высказываются мнения о том, что применение энтропии для описания этой упорядоченности имеет значительные ограничения (Волькенштейн, 1980; Чернавский, 2004). С другой стороны, понятие энтропии может быть применено к биологическим системам; так, энтропия входит в уравнение для изменения количества тепла, образующегося при диссипации энергии в метаболических процессах (Зотин А.И., Зотин А.А., 1999; Тринчер, 1965; Эбелинг и др., 2001). Дальнейшее развитие идеи Шредингера получили в результате синтеза статистической физики, термодинамики и теории информации.

У истоков этого направления, прежде всего, лежат работы выдающегося физика Л. Бриллюэна (1951, 1960, 1966). Ему удалось связать выдвинутое Шредингером понятие упорядоченности (отрицательной энтропии) с информацией. Так, вместо отрицательной энтропии он предложил использовать термин *негэнтропия* (N) как меру упорядоченности системы:

$$N = -S \quad (4).$$

Бриллюэн показал, что негэнтропия может переходить в информацию и обратно. Это положение лежит в основе сформулированного им негэнтропийного принципа информации, согласно которому информация вносит отрицательный вклад в энтропию. Этот принцип, необходимый для понимания процессов, лежащих в основе получения информации, требует более подробного изложения.

Основные положения этого принципа будут рассмотрены мною на основе работ Л. Бриллюэна (1966), Л.А. Блюменфельда (1974), М.В. Волькенштейна (1975, 1980), В. Эбелинга, А. Энгеля, Р. Файстеля (2001). Информацию можно определить как меру количества неопределенности, которая уничтожается после получения сообщения. Количество информации, содержащейся в любом сообщении, равно

$$I = \log_2 \frac{p_1}{p_0} \quad (5),$$

где p_0 — априорная вероятность некоторого события до получения сообщения, а p_1 — после получения сообщения. Если сообщение достоверно, то есть $p_1=1$, то

$$I = -\log_2 p_0 \quad (6),$$

В качестве единицы информации (бит) принимается количество информации, содержащееся в достоверном сообщении о событии, априорная вероятность которого равна $1/2$. Для выражения информации при описании физических систем используется натуральный логарифм \ln (логарифм по основанию e). Целесообразность введения логарифма в формулы, опи-

сывающие информацию и энтропию, определяется тем, что это придает данным величинам свойство аддитивности (Бриллюэн, 1960, 1966).

Энтропия системы, определяемая по уравнению Больцмана (2), связана с информацией следующим образом. Пусть число микросостояний, которые реализуют физическую систему, равно W , а вероятность каждого микросостояния $p_0=1/W$. Допустим, что мы экспериментально, путем множества измерений точно установили, в каком микросостоянии находится система, то есть вероятность ее состояния стала $p_1=1$ (в реальности такой эксперимент невозможен). Полученная информация, согласно (5) равна

$$I = \log_2 \frac{p_1}{p_0} = \log_2 W \quad (7).$$

Формулы (2) и (7) совпадают с точностью до постоянного множителя.

Из этого следует, что энтропия системы эквивалентна количеству информации, недостающему для ее полного описания⁷.

Перенос информации между системами (частями системы) всегда связан с переносом энергии и энтропии. Исследования Л. Бриллюэна показали, что количество переданной информации связано с уменьшением неопределенности системы (H) соотношением:

$$\Delta I = -\Delta H \quad (8).$$

При этом неопределенность для системы с n состояниями задается формулой, предложенной А. Шенноном:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i^{-1} \quad (9),$$

где p_i — вероятность нахождения системы в одном из возможных состояний.

Изменение неопределенности связано с изменением энтропии формулой

$$\Delta S = k\Delta H \quad (10)$$

Величина H вычисляется с помощью натуральных логарифмов.

Следовательно, информация эквивалентна отрицательной энтропии (негэнтропии).

Согласно негэнтропийному принципу, всякая информация, извлеченная из эксперимента (наблюдения), должна быть оплачена энтропией. «Если эксперимент дает информацию ΔI , то в аппаратуре или в лаборатории, где проводится эксперимент, энтропия должна возрасти» (Бриллюэн, 1966/2006, с. 62), то есть

$$k^{-1}\Delta S \geq \Delta I \quad (\text{в энтропийных единицах})^8 \quad (11).$$

Поскольку, согласно (4), прирост энтропии ΔS означает убыль общей негэнтропии, информация оплачивается тем, что количество негэнтропии становится меньше. Соотношение (11) также показывает стоимость информации в термодинамических единицах. Один бит информации равен $k \ln 2 = 2.3 \cdot 10^{-24}$ э.е., то есть очень малой термодинамической величине. Эта величина соответствует минимальной стоимости одного бита информации. Минимальное количество энергии, требуемое на получение одного бита, определяется по формуле⁹:

$$E = T\Delta S = Tk \ln 2 \quad (12),$$

где T — абсолютная температура.

Неравенство (11), очевидно, позволяет оценить ту минимальную цену (возрастание энтропии), которой мозг расплачивается за приобретение, переработку и создание новой информации — процессы, которые сопровождают различные формы поведения. Однако вопрос оценки реального возрастания энтропии и затрат энергии при получении информации достаточно сложен. Так, по мнению ряда авторов (Романовский и др., 1984), эта величина может в десятки раз превышать минимальное значение, то есть в реальных системах количество энтропии, возрастающей при получении (запоминании) информации, значительно больше минимального, таким образом

$$k^{-1}\Delta S \gg \Delta I \quad (13).$$

Вернемся к негэнтропийному принципу Бриллюэна, согласно которому любое получение информации оплачивается повышением энтропии в другой части системы. Невозможно получить информацию об изолированной системе. Поток информации всегда сопровождается пропорциональным ему потоком энтропии. Согласно второму закону термодинамики, энтропия в реальных изолированных системах может только возрастать, а информация — только утрачиваться. Информация может приобретаться только в системах, отдающих энтропию во внешнюю среду, то есть для этих систем необходимы неравновесные условия (Бриллюэн, 1966; Эбелинг и др., 2001). Биологические системы являются открытыми, они способны получать, хранить, перерабатывать и производить новую информацию¹⁰.

⁸ В более общем виде справедливо неравенство $k^{-1}|\Delta S| \geq \Delta I$ (Романовский и др., 1984).

⁹ По мнению М.В. Волькенштейна (2008), биологические системы в процессе эволюции приближаются к состоянию, в котором они «платят» по $kT \ln 2$ за один бит ценной информации и не «платят» ничего за невоспринимаемую информацию, не обладающую ценностью. В принципе разделяя эту точку зрения, добавлю, что вопрос о ценности информации достаточно сложен и неоднозначен.

¹⁰ Основываясь на работах В. Эбелинга, М.В. Волькенштейна, Д.С. Чернавского и Ю.М. Романовского, опишем основные свойства, которым должны удовлетворять информационные системы (в том числе и биологические) (Волькенштейн, 2008; Чернавский, 2004; Эбелинг и др., 2001). В таких системах существует много дискретных стационарных состояний (аттракторов). Информационная емкость

⁷ Информация связана с энтропией соотношением $I+S=\text{const}$. Чтобы перейти от информации (в битах) к энтропии (в энтропийных единицах) надо перейти от логарифма при основании 2 к натуральному логарифму и умножить его на k : $S=1/\log_2 e \cdot kI$ (Блюменфельд, 1974).

Рассмотрим те соотношения между информацией и энтропией, которые, вероятно, имеют место при разумном поведении животных. Так, согласно гипотезе Л.В. Крушинского, в основе рассудочной деятельности животных лежит их способность улавливать простейшие эмпирические законы, связывающие предметы и явления внешней среды. Реализация разумного поведения, по-видимому, состоит из следующих основных составляющих: 1 — получение и запоминание необходимой и достаточной для решения логической задачи информации ΔI_1 . Этот процесс оплачивается возрастанием энтропии в мозге $k^{-1}\Delta S_1 \gg \Delta I_1$; 2 — на основе полученной информации (ΔI_1) происходит создание новой информации (ΔI_2), лежащей в основе алгоритма, реализующего решение данной задачи. Другими словами, ΔI_2 — это информация о законах, связывающих предметы и явления внешней среды. В результате энтропия мозга возрастает на величину ΔS_2 . Реально, согласно (13), $k^{-1}\Delta S_2 \gg \Delta I_2$. Таким образом, общее увеличение энтропии будет описываться неравенством:

$$k^{-1}(\Delta S_1 + \Delta S_2) \gg \Delta I_1 + \Delta I_2 \quad (14).$$

Очевидно, количественные изменения энтропии и информации, происходящие в результате первой стадии, очень малы. Вторая стадия, по-видимому, описывает собственно процесс мышления. Думаю, что количество информации, создающееся в результате решения логической задачи (ΔI_2), и соответствующий прирост энтропии зависит от сложности задачи и может измеряться значительной величиной. В результате предшествующего опыта животное (или человек) может располагать некоторой информацией (I_0), которая составляет часть информации, содержащейся в решаемой задаче. Очевидно, такая информация может облегчить решение задачи. Соответственно, энтропийная плата за решение задачи уменьшится на величину $\Delta S_0 \approx kI_0$.

Основной вывод из описанных выше рассуждений, по-видимому, можно сформулировать следующим образом: за решение логической задачи надо заплатить увеличением энтропии мозга, которое выражается неравенством (13), то есть $k^{-1}\Delta S \gg \Delta I$ ($S \gg k\Delta I$).

Высокая упорядоченность мозга и его функций, возникшая на основе избыточного количества нейронов, по мнению Л.В. Крушинского, является необходимым условием для осуществления мышления. Возрастание энтропии мозга при решении логической задачи, согласно неравенству (13), по существу означает понижение его упорядоченности (неэнтропии). Поэтому, если мозг не обладает некоторым запасом упорядоченности, он просто не сможет заплатить по цене

$\Delta S \gg k\Delta I$ за создание той информации, которая лежит в основе логической задачи (физического закона), и задача в принципе не может быть решена. Так, рыбы в принципе не способны к решению экстраполяционной задачи без предварительного обучения. С этой задачей успешно справляются животные с более совершенным строением мозга (некоторые рептилии, хищные млекопитающие, птицы из семейства вороновых). Более сложную задачу, связанную с оперированием геометрической размерностью фигур, могут решать только животные, обладающие более развитым мозгом. В целом пределы проявления мышления значительно шире у животных, имеющих более сложный мозг (Крушинский, 1977; Зорина, 2005).

Часть свободной энергии, затраченной на решение логической задачи, необратимо переходит в тепловую энергию. Это количество тепла определяется по формуле $\Delta Q = T\Delta S$. Реально, учитывая (13), получим $\Delta Q \gg kT\Delta I$. Поскольку живой организм представляет собой открытую систему, повышение энтропии мозга в результате решения задачи в дальнейшем может компенсироваться за счет свободной энергии, содержащейся в пище, и отвода образовавшегося тепла в окружающую среду. Может ли при этом нервная система перейти на более высокий уровень упорядоченности? По-видимому, да. Однако хочу подчеркнуть, что однозначно определить, как изменится упорядоченность мозга в целом после успешного решения задачи и компенсаторного повышения энтропии внешней среды сложно. Она может возрасти, не измениться или даже снизиться, несмотря на то что была приобретена информация (за счет снижения упорядоченности в других отделах мозга). Наиболее уверенно можно говорить о том, что следствием решения задачи будет перераспределение упорядоченности в мозге.

Несмотря на низкую стоимость информационных процессов в единицах энтропии и энергии, не исключено, что возрастание энтропии и диссипация энергии, сопровождающие мышление, могут нарушать нормальную работу мозга и приводить к невротическим срывам. Увеличение энтропии внешней среды не является мгновенным и очевидным событием. В реальности имеет место некоторая многоступенчатая последовательность событий, приводящая к росту энтропии внешней среды и компенсации энергетической стоимости. По Бриллюэну, «поток информации всегда сопровождается пропорциональным ему потоком энтропии» (Бриллюэн, 1966). Очевидно, что начинаться этот поток будет максимально близко к непосредственному акцептору информации, то есть с подсистем ЦНС, возможно весьма локальных, имеющих непосредственное отношение к получению данной информации. Компенсировать за счет энергии утрату упорядоченности в другом отделе ЦНС, по-видимому, не всегда удастся. Получение «сверхновой» или сверхсложной информации может оплачиваться безвозвратной утратой некоторой исходной информации, необходимой для обеспечения базовых функций. Энергетическая плата за любую операцию, в том числе решение задачи и получение новой информации, является общим местом. Но это не эквивалент энтропийной платы. Утрата упорядоченности — это нечто более сложное, чем трата

системы, измеренная в битах, определяется по формуле $I = \log_2 n$, где n — число состояний. Устойчивость состояний реализуется диссипативными механизмами и практически исключает обусловленный флуктуациями переход. Переход системы из одного стационарного состояния в другое осуществляется в результате внешнего воздействия и лежит в основе механизмов памяти. Одним из необходимых условий осуществления этих механизмов является область, из которой достижимы все состояния (аттракторы) системы. Достижимость определенного аттрактора (группы аттракторов) определяется внешними воздействиями и флуктуациями внутри системы.

возобновляемых энергетических ресурсов, и сложнее восстанавливаемое, потому что помимо энергетической включает и информационную составляющую. О том, что это так, наверное, может говорить даже такой простой и общеизвестный факт, что путем повышения одной только энергетики организма далеко не всегда удастся справиться с неврологическими патологиями.

Действительно, решение логических задач представляет значительные трудности, которые проявляются в снижении адекватности поведения животных в условиях эксперимента. По мнению Л.В. Крушинского, в основе этого явления лежат патологические процессы, развивающиеся из-за перенапряжения мозга, возникающего в результате решения логической задачи. Так, у крыс и черепах в коре и подкорковых структурах мозга после нескольких правильных решений экстраполяционной задачи при использовании метода ЭЭГ была зарегистрирована резко выраженная патологическая активность в виде высоковольтных разрядов и комплексов «пик-волна», характерных для эпилептического припадка. Такие изменения электрической активности предположительно могут быть связаны с нарушением упорядоченных процессов в мозге в результате повышения энтропии в момент решения задачи. Интересно, что, по наблюдениям Л.В. Крушинского, эпилептические припадки и срывы в поведении появлялись у «более умных» животных, решающих задачи с первых предъявлений. В то время как «средние» особи, постепенно обучающиеся правильному решению в ходе экстраполяционных проб и ошибок, не проявляли патологий поведения (Семиохина и др., 1976; Крушинский Л. В., 1986).

Вероятно, запас упорядоченности (негэнтропии) должен значительно превышать повышение энтропии, происходящее при решении определенного класса логических задач, с которыми сталкивается животное данного вида. Высокая упорядоченность может быть тем «запасом прочности», который сводит к минимуму негативные последствия (невротические срывы, неадекватное поведение), которые сопровождают процесс мышления. В обеспечении сохранности этого запаса большую роль играют, по-видимому, и биологические (физиологические) механизмы, развившиеся в эволюции для предотвращения срывов и ограничивающие когнитивную активность нервной системы.

С другой стороны, можно предположить, что существование этого «запаса прочности» (определенного уровня упорядоченности, необходимого мозгу для оплаты решения задачи и восстановления) содержит потенциальную возможность потратить этот запас на решение существенно более сложной задачи, очевидно, с утратой стабильности и невозможности полного восстановления упорядоченности нервной системы. О том, что имеющийся запас прочности мозга в ряде случаев может быть необратимо потрачен на решение «более сложных» задач, косвенно свидетельствуют такие явления, как развитие нервно-психических заболеваний у одаренных людей (Ломброзо, 1892).

С точки зрения теории эволюции и естественного отбора можно предположить, что те особи в популяции, которые жертвуют упорядоченностью нервной

системы ради решения более сложных задач, оказываются в некотором двояком положении. С одной стороны, они решают задачи, недоступные для остальных, и в этом получают несомненное преимущество, но с другой стороны, теряют оптимальное физиологическое функционирование нервной системы, становясь невротиками и лишаясь ряда преимуществ здоровых особей. Эта двоякость может обеспечить довольно длительное сохранение в поколениях неврологически неустойчивых, но решающих сложные задачи особей. Далее очевидно, что формирование на каком-то этапе эволюции дополнительных ресурсов упорядоченности, необходимых для восстановления нервной системы после решения «задач повышенной сложности», обеспечит этим особям уже несомненное превосходство в борьбе за существование над другими. Очевидно также, что меняющиеся внешние условия будут влиять на соотношение плюсов и минусов наличия склонности к решению более сложных задач. В каких-то условиях наличие этой способности может определить выживание только тех особей, у которых эта склонность была, и тем самым существенно увеличить представленность этого признака для последующего отбора и формирования необходимого компенсаторного усложнения нервной системы.

Таким образом, можно предположить, что само существование определенного запаса упорядоченности, необходимого для компенсации энтропии, возникающей при решении задач, создает условия для вектора эволюции, направленного на усложнение мозга и решение более и более сложных задач. Это предположение не исключает более традиционного подхода, когда повышение сложности и упорядоченности мозга возникает случайно, а затем сохраняется и поддерживается в эволюции как положительный признак, позволяющий животному решить более сложную задачу (Крушинский Л. В., 1974, 1977, 1986; Шмальгаузен, 1968). Однако более вероятным представляется сценарий, при котором повышенный когнитивный успех сначала оплачивается утратой устойчивого функционирования нервной системы, а уже затем стимулирует поиск компенсаторных решений в эволюции.

Одним из первых биологов, указавших на увеличение упорядоченности нервной системы в процессе эволюции, был выдающийся ученый И.И. Шмальгаузен (1968). По-видимому, эволюционное усовершенствование мозга, позволяющее решать более сложные логические задачи, реализовалось следующим образом. Происходило увеличение общей упорядоченности мозга в результате увеличения количества и разнообразия нейронов и образуемых ими связей, сложности строения самих нейронов, дифференцировки мозга и т.п. Вероятно, также снижалась реальная плата за решение задачи, определяемая неравенством (13), то есть отношение $\Delta S/k\Delta I$ уменьшалось в процессе эволюции.

Ряд современных работ приводит рассуждения и свидетельства в пользу растущей упорядоченности мозга в ходе эволюции (Başar et al., 2007; Başar, Güntekin 2009; Huang, 2008; Friston, 2010; Carhart-Harris et al., 2014). Прежде всего нужно упомянуть теоретические работы, вызвавшие большой резонанс в нейронауке и претендующие на долгожданную общую теорию

мозга (Huang, 2008; Friston, 2010; Friston et al., 2012 a,b). Эти работы постулируют принцип, в соответствии с которым мозг, как и любая самоорганизующаяся адаптивная система, активно противостоит энтропии (неопределенности), стремясь снизить количество маловероятных состояний и повысить предсказуемость состояний (принцип снижения свободной энергии). Авторы показывают, что практически все виды мозговой деятельности соответствуют этому доминирующему принципу. С ним же, очевидно, согласуются и идеи Дж. Хоукинса о том, что основной функцией мозга является предсказание и формирование внутренних моделей наиболее вероятных внешних конфигураций (Hawkins, Blakeslee, 2005).

Таким образом, разработанная Л.В. Крушинским экстраполяционная теория работы мозга, предполагающая, что животные способны улавливать элементарные законы, связывающие между собой явления природы, приобретает новую актуальность. Характерно в этом контексте название статьи «Животные предвидят наступление событий», посвященной открытию Л.В. Крушинского и вышедшей в 1958 году. Решение когнитивных задач, очевидно, укладывается в обсуждаемый общий принцип, поскольку повышает предсказуемость некоторых внешних событий (причем целого ряда событий в случае, когда речь идет о понимании определенного закона/закономерности).

Трудно не согласиться с тем, что то, каким образом реализуется этот принцип, является наиболее интригующим в понимании работы мозга. В предложенной статье рассматривается вопрос платы за получение новой информации. Я привел теоретические предпосылки и сослался на некоторые экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что за получение этой информации мозг должен заплатить временной утратой исходной упорядоченности, которая, по-видимому, не всегда может быть успешно восстановлена за счет повышения энтропии внешней среды. Эти доводы согласуются с флуктуационной теоремой, в соответствии с которой вероятность повышения энтропии в системе со временем выше, чем ее снижение (следствие второго закона термодинамики). О том, что этот момент был упущен в современных представлениях, свидетельствует высказывание того же Фристана: «In other words, biological systems somehow manage to violate the fluctuation theorem, which generalizes the second law of thermodynamics» (Friston, 2010, p. 127). Наиболее спорным предположением из предложенных здесь для обсуждения является предположение о том, что в эволюции сначала создается некоторый «запас», избыток упорядоченности, которым затем можно оплатить приобретение качественно новой информации.

Литература

- Блюменфельд Л. Л. Проблемы биологической физики. М.: Наука, 1974.
- Бриллюзэн Л. Наука и теория информации. М.: Изд. физ-мат. лит., 1960.
- Бриллюзэн Л. Научная неопределенность и информация. М.: Мир, 1966.
- Васильев А. М. Введение в статистическую физику. М.: Высшая школа, 1980.
- Волькенштейн М. В. Молекулярная биофизика. М.: Наука, 1975.
- Волькенштейн М. В. Физика и биология. М.: Наука, 1980.
- Волькенштейн М. В. Биофизика. СПб.: Лань, 2008.
- Грин Б. Ткань космоса. М.: УРСС, 2000.
- Животные предвидят наступление событий. Открытие советского физиолога // *Życie Warszawy*. 13.02.1958. № 38 (4459).
- Зорина З. А. Мышление животных: эксперименты в лаборатории и наблюдения в природе // *Зоологический журнал*. 2005. Т. 84. № 1. С. 134–148.
- Зотин А. И., Зотин А. А. Направление скорости и механизмы прогрессивной эволюции. М.: Наука, 1999.
- Кастлер Г. Возникновение биологической организации. М.: Мир, 1967.
- Крушинский А. Л. Биофизические аспекты рассудочной деятельности // Формирование поведения животных в норме и патологии. К 100-летию со дня рождения Л. В. Крушинского (1911–1984) / Под ред. И. И. Полетаевой, З. А. Зориной. М.: Языки славянской культуры, 2013. С. 424–436.
- Крушинский Л. В. Элементарная рассудочная деятельность животных и ее роль в эволюции // *Философия в современном мире. Философия и теория эволюции*. М.: Наука, 1974. С. 156–215.
- Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности. М.: Изд. МГУ, 1977.
- Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. МГУ, 1986.
- Крушинский Л. В. О возможном механизме рассудка // Формирование поведения животных в норме и патологии. К 100-летию со дня рождения Л. В. Крушинского (1911–1984) / Под ред. И. И. Полетаевой, З. А. Зориной. М.: Языки славянской культуры, 2013. С. 437–450.
- Ленинджер А. Основы биохимии. Т. 2. М.: Мир, 1985.
- Ломброзо Ч. Гениальность и помешательство. СПб.: Издание Ф. Павленкова, 1892.
- Перепелкина О. В., Маркина Н. В., Полетаева И. И. Способность к экстраполяции направления движения у мышей, селекционированных на большой и малый вес мозга: влияние пребывания в «обогащенной» среде // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*. 2006. Т. 56. № 2. С. 244–248.
- Полетаева И. И. Гипотеза Л. В. Крушинского «О возможном механизме рассудка» и развитие нейробиологии во второй половине XX века // Формирование поведения животных в норме и патологии. К 100-летию со дня рождения Л. В. Крушинского (1911–1984) / Под ред. И. И. Полетаевой, З. А. Зориной. М.: Языки славянской культуры, 2013. С. 451–454.
- Попова Н. В., Кесарев В. С., Полетаева И. И., Романова Л. Г. Корковая цитоархитектоника корковых структур у мышей, селекционированных на большой и малый вес мозга // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*. 1983. Т. 33. № 3. С. 576–582.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: УРСС, 2000.
- Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984.
- Рубин А. Б. Биофизика. Книга 1. Теоретическая биофизика. М.: Высшая школа, 1987.
- Сахаров Д. А. Биологический субстрат генерации поведенческих актов // *Журнал общей биологии*. 2012. Т. 73. № 5. С. 334–348.
- Семиохина А. Ф., Очинская Е. И., Рубцова Н. Б., Крушинский Л. В. Новое в изучении экспериментальных неврозов, вызванных перенапряжением высшей нервной деятельности // *Доклады АН СССР*. 1976. Т. 231. № 2. С. 503–505.
- Тринчер К. С. Биология и информация. М.: Наука, 1965.
- Хакен Г. Информация и самоорганизация. М.: Мир, 1991.
- Чернавский Д. С. Синергетика и информация. М.: УРСС, 2004.

Шмальгаузен И. И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968.

Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики. М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1947.

Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. М.: УРСС, 2001.

Bargmann C. I. Beyond the connectome: how neuromodulators shape neural circuits // *Bioessays*. 2012. Vol. 34. No. 6. P. 458–465. doi:10.1002/bies.201100185

Başar E., Güntekin B. A breakthrough in neuroscience needs a “Nebulous Cartesian System”: Oscillations, quantum dynamics and chaos in the brain and vegetative system // *International Journal of Psychophysiology*. 2007. Vol. 64. No. 1. P. 108–122. doi:10.1016/j.ijpsycho.2006.07.012

Başar E., Güntekin B. Darwin's evolution theory, brain oscillations, and complex brain function in a new “Cartesian view” // *International Journal of Psychophysiology*. 2009. Vol. 71. No. 1. P. 2–8. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.07.018

Brillouin L. Physical entropy and information. II // *Journal of Applied Physics*. 1951. Vol. 22. No. 3. P. 338–343. doi:10.1063/1.1699952

Carhart-Harris R. L., Leech R., Hellyer P. J., Shanahan M., Feilding A., Tagliazucchi E., Chialvo D. R., Nutt D. The entropic brain: a theory of conscious states informed by neuroimaging research with psychedelic drugs // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014. Vol. 8. doi:10.3389/fnhum.2014.00020

Davie C. A. A review of Parkinson's disease // *British Medical Bulletin*. 2008. Vol. 86. No. 1. P. 109–127. doi:10.1093/bmb/ldn013

Friston K. The free-energy principle: a unified brain theory? // *Nature Reviews Neuroscience*. 2010. Vol. 11. No. 2. P. 127–138. doi:10.1038/nrn2787

Friston K., Breakspear M., Deco G. Perception and self-organized instability // *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2012a. Vol. 6. P. 44. doi:10.3389/fncom.2012.00044

Friston K., Thornton C., Clark A. Free-energy minimization and the dark-room problem // *Frontiers in psychology*. 2012b. Vol. 3. P. 130. doi:10.3389/fpsyg.2012.00130

Hawkins J., Blakeslee S. On intelligence. New York: Times Books, 2004.

Huang G. Is this a unified theory of the brain // *New Scientist*. 2008. Vol. 2658. P. 30–33.

Toga A. W., Clark K. A., Thompson P. M., Shattuck D. W., Van Horn J. D. Mapping the human connectome // *Neurosurgery*. 2012. Vol. 71. No. 1. P. 1–5. doi:10.1227/NEU.0b013e318258e9ff

Zecevic D., Wu J.-Y., Cohen L. B., London J., Hopp H., Falk C. X. Hundreds of neurons in the Aplysia abdominal ganglion are active during the gill-withdrawal reflex // *The Journal of Neuroscience*. 1989. Vol. 9. No. 10. P. 3681–3689.

discussion

The Cost of Problem Solving: Biophysical Background and Probable Evolutionary Consequences

Alexey Krushinsky

Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. 40 years ago, L. V. Krushinsky published a discussion paper entitled “On the possible mechanism of mind” in which he suggested that the order and redundancy of the brain’s neurons should be greater as more complex cognitive tasks are performed. Analysis of thermodynamic and biophysical literature suggests that this idea has clear physical foundations. Based on the provisions of E. Schrödinger, L. Boltzmann, L. Brillouin and C. Shannon, one can show that solving a logical problem involves “paying” with a transitional increase in entropy (disorder) of the brain. Compensating for this disorder with its energy supply and an increase in environmental entropy might not be simple. Therefore, the brain as a biological system should be more ordered to engage in complex tasks, in order to be able to pay with disorder for the new information it gets. The biophysical conclusion that the brain has a redundancy of order that exceeds the information complexity of solved tasks suggests a possible role of this phenomenon in the biological evolution of the nervous system.

Correspondence: dyakonova.varvara@gmail.com; Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, 119234, GSP-1, Vorob'evy Gory, 1, corp. 12, Moscow, Russia

Keywords: cognitive evolution, cognition, information, entropy, problem solving, extrapolation

Copyright © 2015. Alexey Krushinsky. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Note. This paper is based on the earlier publication of the following chapter: Krushinsky, A.L. (2013). [Biophysical aspects of reasoning ability]. In Z. A. Zorina & I. I. Poletaeva (Eds.) [Formation of normal and pathological animal behavior: Book dedicated to the 100th anniversary of L. V. Krushinsky (1911–1984)] (pp. 424–436). Moscow: Yaziki slavyanskoj kultury. Posthumous revisions incorporated by V. E. Dyakonova.

Acknowledgments. I would like to express my gratitude to V. E. Dyakonova for her assistance with the manuscript preparation and to S. B. Rozanov for his valuable comments. The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research Grants #14-04-00537, #13-04-00747 and #12-04-00360.

Received 30 July 2014, accepted 18 March 2015.

References

- Bargmann, C.I. (2012). Beyond the connectome: how neuro-modulators shape neural circuits. *Bioessays*, 34(6), 458–465. doi:10.1002/bies.201100185
- Başar, E., & Güntekin, B. (2007). A breakthrough in neuroscience needs a “Nebulous Cartesian System”: Oscillations, quantum dynamics and chaos in the brain and vegetative system. *International Journal of Psychophysiology*, 64(1), 108–122. doi:10.1016/j.ijpsycho.2006.07.012
- Başar, E., & Güntekin, B. (2009). Darwin's evolution theory, brain oscillations, and complex brain function in a new “Cartesian view”. *International Journal of Psychophysiology*, 71(1), 2–8. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.07.018
- Blumenfeld, L. A. (1974). [Problems of biological physics]. Moscow: Nauka. (Russian).
- Brillouin, L. (1951). Physical entropy and information. II. *Journal of Applied Physics*, 22(3), 338–343. doi:10.1063/1.1699952
- Brillouin, L. (1956). *Science and information theory*. N.Y.: Academic Press.

- Brillouin, L. (1964). *Scientific uncertainty and information*. N.Y.: Academic Press.
- Carhart-Harris, R. L., Leech, R., Hellyer, P. J., Shanahan, M., Feilding, A., Tagliazucchi, E., Chialvo, D. R., & Nutt, D. (2014). The entropic brain: a theory of conscious states informed by neuroimaging research with psychedelic drugs. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. doi:10.3389/fnhum.2014.00020
- Chernavsky, D. S. (2004). *[Synergetics and information]*. Moscow: URSS. (Russian).
- Davie, C. A. (2008). A review of Parkinson's disease. *British Medical Bulletin*, 86(1), 109–127. doi:10.1093/bmb/ldn013
- Ebeling, W., Engel, A., & Feistel, R. (1990). *Physik der evolution-sprozesse*. Berlin: Academic Verlag. (German).
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138. doi:10.1038/nrn2787
- Friston, K., Breakspear, M., & Deco, G. (2012). Perception and self-organized instability. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 6, 44. doi:10.3389/fncom.2012.00044
- Friston, K., Thornton, C., & Clark, A. (2012). Free-energy minimization and the dark-room problem. *Frontiers in Psychology*, 3, 130. doi:10.3389/fpsyg.2012.00130
- Grin, B. (2000). *Tkan' kosmosa [The cloth of Cosmos]*. Moscow: URSS. (Russian).
- Haken, H. (1988). *Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems*. Berlin: Springer.
- Hawkins, J., & Blakeslee, S. (2004). *On intelligence*. New York: Times Books.
- Huang, G. (2008). Is this a unified theory of the brain. *New Scientist*, 2658, 30–33.
- Kastler, G. (1967). *The Origin of Biological Organization [Russian translation]*. Moscow: Mir.
- Krushinsky, A. L. (2013). [Biophysical aspects of reasoning ability]. In I. I. Poletaeva, & Z. A. Zorina (Eds.), *[The development of behavior: its normal and abnormal aspects. To the 100 anniversary of L. V. Krushinsky]* (pp. 424–436). Moscow: LRC Publ. (Russian).
- Krushinsky, L. V. (1974). Jelementarnaja rassudoch'naja dejatel'nost' zhivotnyh i ee rol' v jevoljucii [Elementary reasoning in animals and its evolutionary role]. In *Filosofija v sovremennom mire. Filosofija i teorija jevoljucii [Philosophy in modern world. Philosophy and the theory of evolution]* (pp. 156–215). Moscow: Nauka. (Russian).
- Krushinsky, L. V. (1977). *[Biological basis of reasoning ability]*. Moscow: Moscow State University. (Russian).
- Krushinsky, L. V. (1986). *[Biological basis of reasoning ability]* 2nd ed. Moscow: Moscow State University. (Russian).
- Krushinsky, L. V. (2013). [On possible mechanism of the mind]. In I. I. Poletaeva, & Z. A. Zorina (Eds.), *[The development of behavior: its normal and abnormal aspects. To the 100 anniversary of L. V. Krushinsky]* (pp. 437–450). Moscow: LRC Publ. (Russian).
- Leniniger, A. (1985). *Basic biochemistry*. Vol. 2. Moscow: Mir. (Russian).
- Lombroso, C. (1892). Genius and insanity. In *Lombroso, C. The man of genius* (pp. 66–99). New York: Charles Scribner's Sons. doi:10.1037/10996-004
- Perepelkina, O. V., Markina, N. V., & Poletaeva, I. I. (2006). [The ability to extrapolate the direction of movement in mice selected for large and small brain weight: The influence of environmental enrichment]. *Zhurnal vysshej nervnoj deiatel'nosti [Journal of higher nervous activity]*, 56(2), 244–248. (Russian).
- Poletaeva, I. I. (2013). [The hypothesis of L. V. Krushinsky on "Possible mechanism of mind" and several ideas in neurobiology from the second part of XX century]. In I. I. Poletaeva, & Z. A. Zorina (Eds.), *[The development of behavior: its normal and abnormal aspects. To the 100 anniversary of L. V. Krushinsky]* (pp. 451–454). Moscow: LRC Publ. (Russian).
- Popova, N. V., Kesarev, V. S., Poletaeva, I. I., & Romanova, L. G. (1983). [Cytoarchitectonics of the cerebral cortex in mice selected for high and low brain weight]. *Zhurnal vysshej nervnoj deiatel'nosti imeni IP Pavlova*, 33(3), 576–582. (Russian).
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature* (Vol. 13). N.Y.: Bantam books.
- Romanovsky, Y. M., Stepanova, N. V., & Chernavsky, D. S. (1984). *[Mathematical biophysics]*. Moscow: Nauka. (Russian).
- Rubin, A. B. (1987). *[Biophysics. Vol. 1. Theoretical biophysics]*. Moscow: Vysshaya shkola. (Russian).
- Sakharov, D. A. (2012). [The biological substrate for the generation of behavioral acts]. *Zhurnal Obshchei Biologii [Journal of General Biology]*, 73(5), 334–348. (Russian).
- Schrödinger, E. (1944). *What is life? : The physical aspect of the living cell*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Semiokhina, A. F., Ochinskaya, E. I., Rubtsova, N. B., & Krushinsky, L. V. (1976). Novoe v izuchenii jeksperimental'nyh nevrozov, vyzvannyh perenaprjazheniem vysshej nervnoj dejatel'nosti [Advances in research on experimental neuroses evoked by the overexcitation of higher nervous activity]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 231(2), 503–505. (Russian).
- Shmalgauzen, I. I. (1968). *Kiberneticheskie voprosy biologii [Cybernetic aspects of biology]*. Novosibirsk: Nauka. (Russian).
- Toga, A. W., Clark, K. A., Thompson, P. M., Shattuck, D. W., & Van Horn, J. D. (2012). Mapping the human connectome. *Neurosurgery*, 71(1), 1–5. doi:10.1227/NEU.0b013e318258e9ff
- Trincher, K. S. (1965). *Biology and information: elements of biological thermodynamics*. N.Y.: Plenum Publishing Corporation.
- Vasilev, A. M. (1980). *[An introduction to statistical physics]*. Moscow: Vysshaya shkola. (Russian).
- Volkenstein, M. V. (1977). *Molecular biophysics*. N.Y.: Academic Press.
- Volkenstein, M. V. (1982). *Physics and biology*. N.Y.: Academic Press.
- Volkenstein, M. V. (2008). *[Biophysics]*. Saint Petersburg: Lan. (Russian).
- Zecevic, D., Wu, J.-Y., Cohen, L. B., London, J., Hopp, H., & Falk, C. X. (1989). Hundreds of neurons in the Aplysia abdominal ganglion are active during the gill-withdrawal reflex. *The Journal of Neuroscience*, 9(10), 3681–3689.
- Zorina, Z. A. (2005). Myshlenie zhivotnyh: jeksperimenty v laboratorii i nabljudenija v prirode [Animal reasoning: laboratory experiments and natural observations]. *Zoologicheskii Zhurnal [Zoological Journal]*, 84(1), 134–148. (Russian).
- Zotin, A. I., & Zotin, A. A. (1999). *Napravlenie, skorost' i mekhanizmy progressivnoi evolyutsii [Direction, rate, and mechanisms of progressive evolution]*. Moscow: Nauka. (Russian).
- [Animals foresee the upcoming events. The discovery of the Soviet physiologist]. *Życie Warszawy*, 13.02.1958, 38(4459). (Polish).

ДИСКУССИЯ

Должен ли мозг платить за решение задачи?

Некоторые вопросы, возникшие по поводу статьи А. Л. Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия»

Андрей Курганский

Лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, Институт возрастной физиологии, РАО, Москва

Аннотация. В своей статье А. Л. Крушинский (этот выпуск, с. 52–61) выдвинул тезис о том, что выполнение когнитивных операций оплачивается утратой мозгом изначального запаса упорядоченности. Это положение ставится под сомнение с точки зрения (1) принципов физики систем, далеких от термодинамического равновесия, (2) данных о развитии мозга в онтогенезе, (3) неоднозначной роли избыточности (4) и нашего недостаточного знания о характере преобразования информации, лежащих в основе когнитивных операций.

Контактная информация: Андрей Васильевич Курганский, akurg@yandex.ru; ул. Погодинская, д. 8, корп. 2, Институт возрастной физиологии РАО, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, 119121 Москва, Россия.

Ключевые слова: энтропия, неравновесные системы, развитие мозга, избыточность, когнитивные операции

© 2015 Андрей Васильевич Курганский. Данная статья доступна по лицензии *Creative Commons "Attribution"* («Атрибуция») 4.0. *всемирная*, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2015 г. Принята в печать 27 марта 2015 г.

Основной тезис статьи А. Л. Крушинского заключается в том, что «за решение логической задачи надо заплатить увеличением энтропии мозга». К этому утверждению автор подводит читателя, проследивая основные исторические вехи в разрешении вопроса о связи между термодинамической энтропией и информацией. Принятие этого тезиса означает, что необходимым условием функционирования мозга является его «высокая упорядоченность», которую автор, следуя Л. В. Крушинскому, связывает с избыточным числом нейронов, и постепенной потерей которой мозг оплачивает получение и создание информации. Следствия заявленного принципа для теории эволюции иллюстрируются в статье на ряде примеров.

Неудивительно, что работа, затрагивающая столь широкий круг вопросов и опирающаяся на столь широкий круг научных дисциплин — от статистической физики и биофизики до теории эволюции и когнитивной науки, поневоле носит конспективный характер. Однако общее впечатление, возникающее при знакомстве с этой работой, можно, пожалуй, выразить так: автор рисует слишком уж благостную картину, в которой все положения представляются стоящими на фундаменте твердо установленных фактов. Между тем такова ли эта картина в реальности? И главное — автор,

как мне представляется, не привел весомых аргументов в пользу своего главного тезиса, в то время как изложение связи между термодинамической и информационной энтропией можно найти в учебниках. Остается неясным, почему именно мозг должен расплачиваться за решение задачи. Возможно, для автора было вполне очевидным по каким-то причинам, однако я этих причин не увидел и не уверен, что их увидят и другие читатели. Ниже я коснусь некоторых вопросов, которые, как мне представляется, имеют непосредственное отношение к основному тезису статьи, сохраняя при этом принятую А. Л. Крушинским несколько антропоморфную терминологию («логические задачи» и «рассудочная деятельность»).

1. Порядок и хаос в открытых системах, далеких от термодинамического равновесия

К основному тезису работы А. Л. Крушинский подводит читателя с помощью последовательности следующих логических шагов. Энтропия характеризует

степень «беспорядка» в системе, а негэнтропия (энтропия, взятая с противоположным знаком) характеризует степень «упорядоченности» системы. Делается допущение, что информация эквивалентна негэнтропии. Согласно второму началу термодинамики, энтропия замкнутой системы не может убывать. Получение информации организмом эквивалентно уменьшению энтропии в подсистеме «организм» и оно оплачивается ростом энтропии во внешней среде, так чтобы суммарная энтропия системы «организм + внешняя среда» не уменьшалась бы. Однако с точки зрения этой последовательности вывод, к которому приходит автор работы, выглядит несколько неожиданно: выходит, что получение живым организмом информации о закономерностях внешней среды и «мыслительный процесс» увеличивают энтропию именно мозга, а не внешней среды, как, казалось бы, следует из предыдущих логических построений. Все выглядит так, как будто негэнтропия нарастает не в ЦНС, а где-то в «уме» или «душе», по отношению к которым мозг почему-то выступает в качестве «внешней среды».

Рассмотрим спонтанное возникновение упорядоченной структуры в жидкости, находящейся в неравновесных условиях — пример, который использует Германн Хакен (1991), иллюстрируя процессы самоорганизации. Если плоскую кювету с маслом равномерно подогревать снизу, при определенной температуре помимо хаотического теплового движения молекул в масле возникает макроскопически упорядоченная структура — конвекционные ячейки, напоминающие пчелиные соты. В этом примере мы имеем очевидный случай упорядочивания системы (масла). Куда делся избыток энтропии? Ответ очевиден: увеличилась энтропия окружающей среды. Почему же, говоря о мозге, мы должны рассуждать по-другому и полагать, что в случае получения им (или создания в нем) новой информации избыток энтропии должен непременно уменьшать степень его упорядоченности?

Соотношение между информационной и термодинамической энтропией, на которое опирался А.Л. Крушинский, получено в рамках термодинамики равновесных систем. Насколько оправдан такой подход применительно к мозгу? В живом функционирующем мозге (автор справедливо отмечает, что мозг представляет собой открытую и далекую от термодинамического равновесия систему) можно выделить различные степени свободы: колебательные и вращательные степени свободы свободных молекул в жидких фракциях, колебательные степени свободы в молекулах в связанном состоянии, определенные конфигурации нейронов, связанных в сети и т.п. Достижение организмом теплового (термодинамического) равновесия означало бы, что энергия равномерно распределена по этим степеням свободы. Так ли это на самом деле? На уровне отдельного нейрона мы наблюдаем резкие градиенты концентраций ионов (достаточно вспомнить здесь натриево-калиевый насос, поддерживающий трансмембранный потенциал покоя в нейроне). Происходит активный обмен не только энергией, но и массой с внешней для мозга средой (синтез белков). Среди прочего можно выделить степени свободы, связанные с биоэлектрическими явлениями. Как бы

выглядели электрические явления в мозге, находящемся в состоянии термодинамического равновесия? Они выродились бы в спонтанные флуктуации. Вместо этого мы наблюдаем отчетливую упорядоченность биоэлектрических процессов, проявляющуюся даже в том случае, когда мы имеем дело с суммарными потенциалами, регистрируемыми с поверхности головы (ЭЭГ). Таким образом, различные уровни (молекулярный, клеточный, системный) не находятся в состоянии теплового равновесия, и обмен между ними протекает со скоростями, определяемыми структурными особенностями этих уровней.

С точки зрения обсуждаемого вопроса особый смысл приобретает одно замечание Л. А. Блюменфельда (1977). Разбирая пример со свободными нуклеотидами, объединяющимися в биополимерную структуру, он отмечает, что принципиальное значение для биологических систем приобретает понятие *конструкции*. Возникновение конструкций — устойчивых долгоживущих агрегаций — связывает ранее независимые степени свободы и радикальным образом меняет число микроскопических состояний и их вероятности, а также характерное время возврата в равновесное состояние (время релаксации) и тем самым — оценку упорядоченности биологической системы.

Кроме того, вопрос о соотношении термодинамической и информационной энтропии отнюдь не является тривиальным. Г. Хакен (1991) отмечает два существенных свойства Шенноновской информации: 1) она никак не учитывает смысл сигнала и 2) относится к замкнутым системам, то есть предполагает заданный набор («алфавит») сигналов.

Г. Хакен (1991) рассматривает существенно нелинейные динамические системы вида

$$\frac{dq(t)}{dt} = F(q(t), \lambda) + e(t)$$

которые описывают эволюцию вектора состояния системы $q(t)$. Сигнал (например, сенсорный сигнал, несущий информацию о внешнем мире) воздействует на такую динамическую систему посредством изменения параметра λ . К моменту прихода сигнала система уже обладает некоторым набором динамически устойчивых состояний — аттракторов. Внешнее воздействие может создавать новые аттракторы, присутствие стохастической части — шума $e(t)$ — позволяет системе непредсказуемо переходить к одному из множества аттракторов, то есть фактически изменять вероятности микросостояний системы (нарушение предположения о равной вероятности всех микроскопических состояний, на котором основана формула Больцмана).

Один из полученных Г. Хакеном результатов заключается в том, что в системе, далекой от термодинамического равновесия, энтропия может возрастать, несмотря на то, что эта система переходит в более упорядоченное состояние. Что в этом случае следует думать об энтропийной плате за возникновение порядка? Основной тезис А.Л. Крушинского, по крайней мере по первому впечатлению, находится в явном противоречии с этим результатом.

Боле того, для того чтобы учесть осмысленность (значимость) сигнала, Хакен вводит понятие относительной значимости, и в формуле Шеннона у него фигурируют не вероятности, а величины относительной значимости. С одной стороны, при таком подходе создание нового аттрактора становится возможным понимать как возникновение смысла, «самозарождение» смысла. С другой стороны, отказ от использования вероятности микроскопических состояний в формуле Шеннона делает менее очевидной связь полученной меры с термодинамической энтропией.

2. Онтогенез и информационная энтропия

Развитие организма начинается с одной клетки. Человеческое тело содержит примерно 10^{14} клеток, из которых примерно 10^{10} образуют мозг. В какой момент происходит формирование того изначального и растрачиваемого в процессе последующей рассудочной деятельности запаса упорядоченности, о котором говорит А. Л. Крушинский? В онтогенезе мозг человека претерпевает грандиозные структурные изменения. До четырехмесячного возраста происходят запрограммированная гибель нейронов и, одновременно с этим, синаптогенез, который сменяется синаптическим прунингом (удалением «лишних» синапсов), продолжающимся в течение всего жизненного пути человека. Миелинизация, дендритная и аксонная арборизация происходят фактически на протяжении всего жизненного цикла человека (Lenroot, Giedd, 2006). Не следует забывать также, что и во взрослом состоянии (в том числе и у человека) происходит рождение новых нейронов (Eriksson et al., 1998; Ernst et al., 2014). На фоне этих процессов от младенчества до конца жизни происходит рассудочная деятельность. На всех ли этапах она сопровождается потерей упорядоченности мозга? Все эти процессы должны быть как-то учтены при количественной оценке степени упорядоченности мозга.

3. Избыточность как излишек и как достаточный запас

Говоря об избыточности, А. Л. Крушинский отмечает, что им «используется общепринятое представление об избыточности как о наличии большего количества нейронов, чем то, которое могло бы обеспечить нормальное функционирование организма» (с. 53). Оставив в стороне вопрос о том, насколько такое определение можно считать «общепринятым» (об этом чуть ниже), отмечу, что понятие избыточности является относительным. Можно оценивать избыточность структурной организации мозга по отношению к определенному кругу задач, к определенной ситуации. Так, «ситуативно-избыточным» является опорно-двигательный аппарат. В частности, кинематические цепи руки обладают существенно большим числом степеней

свободы (более 30), чем это необходимо для выполнения движений, составляющих двигательный типичный репертуар человека.

Для обоснования тезиса об избыточности автор статьи приводит результаты опытов на животных. Мне представляется, что опыты на животных иллюстрируют именно ситуативную структурную избыточность мозга, поскольку в экспериментах с неизбежностью исследуются лишь вполне определенные аспекты поведения, показывающие отсутствие влияния разрушения части мозга на наблюдаемые функции. Между тем, с точки зрения жизненного пути организма, то, что представляется избыточным ситуативно, может оказаться необходимым условием развития и адаптивного поведения. С позиций нейро-дарвинизма (Sporns, Edelman, 1993; Hadders-Algra, 2000, 2010) наличие подобной ситуативной избыточности является необходимым условием развития — отбора «полезных» нейронных конфигураций и образования связей между ними. С точки зрения филогенеза, индивидуальная избыточность, приводящая к внутривидовому разнообразию, может оказаться необходимой для эволюционной судьбы рода.

Таким образом, пониманию термина «избыточность» в смысле чего-то излишнего, на что явно указывает принятое А. Л. Крушинским определение избыточности, можно, следуя И. М. Гельфанду и М. Л. Латашу (1998), противопоставить понимание этого термина в смысле наличия достаточного запаса. В английском языке этим двум оттенкам смысла соответствуют два слова — *redundancy* и *abundance*.

4. Об информационной природе логических (когнитивных) операций

В статье утверждается, что «Минимальное количество энергии, требуемое на получение одного бита, определяется по формуле: $E = T\Delta S = Tk \ln 2$ (12)» (с. 55). Между тем обсуждать энтропийную плату за решение логической задачи, не вдаваясь при этом в характер самих логических операций, представляется интуитивно не вполне оправданным. Много ли мы знаем о природе этих операций? Оправдано ли рассматривать все эти операции как имеющие одну природу? Поясню этот вопрос: ряд исследований показывает, что, как минимум, следует различать логически необратимые и обратимые процессы преобразования информации. В соответствии с принципом Ландауэра (Landauer, 1961), энергетическая плата в виде диссипации тепловой энергии составляет $kT \ln 2$ Дж/бит, но относится исключительно к необратимым преобразованиям информации. Этому, как следует из соотношения (12), очевидно, соответствует и «энтропийная плата»: $\Delta S = \Delta Q/T$. Недавно была выполнена экспериментальная работа (Orlov et al., 2012), которая подтвердила существенное различие между необратимыми и обратимыми преобразованиями информации. Оказалось, что в случае необратимого преобразования информации диссипация энергии в пересчете на один бит существенно превос-

ходит теоретический нижний предел $kT \ln 2$, в то время как осуществление обратного преобразования практически не сопровождается рассеянием тепла, и в этом смысле, как отмечают авторы этого исследования, «there is no fundamental lower limit to the amount of energy dissipation required to move information from place to place. Communication is in this sense fundamentally free» (стр. 06FE10-5). Существуют ли обратимые и необратимые когнитивные процессы? Если да, то их следует различать, и энтропийная плата, очевидно, будет зависеть от соотношения тех и других.

Возникает и ряд других вопросов. Что является результатом решения логической задачи? Всегда ли это решение является созданием новой информации? Рассмотрим простейший пример: некто хранил в своей памяти N фактов, по видимости не связанных друг с другом. В результате рассудочной деятельности им была установлена причинная связь между ними, и все N фактов оказались следствиями давно известного рассуждающему субъекту закона. Следует ли полагать, что в этом случае результатом рассудочной деятельности было создание новой информации? Не следует ли считать, что исчезновение N самостоятельных фактов означает исчезновение информации? Каков итоговый баланс между приобретением и потерей информации?

Справедливости ради следует отметить, что автор отмечает, насколько сложен вопрос, в примечании: «По мнению М. В. Волькенштейна (2008), биологические системы в процессе эволюции приближаются к состоянию, в котором они “платят” по $kT \ln 2$ за один бит ценной информации и не “платят” ничего за невоспринимаемую информацию, не обладающую ценностью. В принципе, разделяя эту точку зрения, добавлю, что вопрос о ценности информации достаточно сложен и неоднозначен» (с. 55).

Вместо заключения

Настоящие заметки оформились в результате рецензирования первого варианта статьи А. Л. Крушинского, направленного в редакцию «Российского журнала когнитивной науки». Лишь позже я с прискорбием узнал, что Алексея Леонидовича Крушинского уже нет с нами. Найти общий объяснительный принцип, увидеть простое в сложном — это извечная потребность человеческого ума. Именно к этому стремился Алексей Леонидович, и его попытка не прошла даром — она вызвала к жизни научную дискуссию.

Литература

- Блюменфельд Л. А. Проблемы биологической физики. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1977.
- Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991.
- Eriksson P. S., Perfilieva E., Björk-Eriksson T., Alborn A.-M., Nordborg C., Peterson D. A., Gage F. H. Neurogenesis in the adult human hippocampus // *Nature Medicine*. 1998. Vol. 4. No. 11. P. 1313–1317. doi:10.1038/3305
- Ernst A., Alkass K., Bernard S., Salehpour M., Perl S., Tisdale J., Possnert G., Druid H., Frisén J. Neurogenesis in the striatum of the adult human brain // *Cell*. 2014. Vol. 156. No. 5. P. 1072–1083. doi:10.1016/j.cell.2014.01.044
- Gelfand I. M., Latash M. L. On the problem of adequate language in motor control // *Motor Control*. 1998. Vol. 2. No. 4. P. 306–313.
- Hadders-Algra M. The neuronal group selection theory: a framework to explain variation in normal motor development // *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2000. Vol. 42. No. 8. P. 566–572. doi:10.1017/S0012162200001067
- Hadders-Algra M. Variation and variability: key words in human motor development // *Physical Therapy*. 2010. Vol. 90. No. 12. P. 1823–1837. doi:10.2522/ptj.20100006
- Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process // *IBM Journal of Research and Development*. 1961. Vol. 5. No. 3. P. 183–191.
- Lenroot R. K., Giedd J. N. Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2006. Vol. 30. No. 6. P. 718–729. doi:10.1016/j.neubiorev.2006.06.001
- Orlov A. O., Lent C. S., Thorpe C. C., Boechler G. P., Snider G. L. Experimental test of Landauer's Principle at the sub-kBT level // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 51. No. 6S. P. 06FE10. doi:10.1143/JJAP.51.06FE10
- Sporns O., Edelman G. M. Solving Bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection // *Child Development*. 1993. Vol. 64. No. 4. P. 960–981. doi:10.2307/1131321

discussion

Is the Brain Bound to Pay a Price for Cognition?

SEVERAL CONCERNS RAISED BY A. L. KRUSHINSKY PAPER ENTITLED “THE COST OF PROBLEM SOLVING: BIOPHYSICAL BACKGROUND AND PROBABLE EVOLUTIONARY CONSEQUENCES”.

Andrei V. Kurgansky

Laboratory of neurophysiology of cognitive processes, Institute of developmental physiology, Russian Academy of Education, Moscow, Russia

Abstract. A. L. Krushinsky suggested that, as the brain performs cognitive operations, it is bound to pay a price by losing its initial supply of order. The validity of this suggestion is questioned on the grounds of (1) the principles of physics of non-equilibrium systems, (2) brain development data, (3) ambiguous role of redundancy, and (4) insufficient knowledge of the nature of information processing underlying cognitive operations.

Correspondence: Andrei V. Kurgansky, akurg@yandex.ru; Laboratory of neurophysiology of cognitive processes, Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, 8 Pogodinskaya st., corp. 2, 119121 Moscow, Russia

Keywords: entropy, non-equilibrium systems, brain development, redundancy, cognitive operations

Copyright © 2015. Andrei V. Kurgansky. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Received 23 March 2015, accepted 27 March 2015.

References

- Blumenfeld, L. A. (1977). *[Problems of biological physics]*. M.: Nauka. (Russian).
- Eriksson, P. S., Perfilieva, E., Björk-Eriksson, T., Alborn, A.-M., Nordborg, C., Peterson, D. A., & Gage, F. H. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nature Medicine*, 4(11), 1313–1317. doi:10.1038/3305
- Ernst, A., Alkass, K., Bernard, S., Salehpour, M., Perl, S., Tisdale, J., Possnert, G., Druid, H., & Frisén, J. (2014). Neurogenesis in the striatum of the adult human brain. *Cell*, 156(5), 1072–1083. doi:10.1016/j.cell.2014.01.044
- Gelfand, I. M., & Latash, M. L. (1998). On the problem of adequate language in motor control. *Motor Control*, 2(4), 306–313.
- Hadders-Algra, M. (2000). The neuronal group selection theory: a framework to explain variation in normal motor development. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(8), 566–572. doi:10.1017/S0012162200001067
- Hadders-Algra, M. (2010). Variation and variability: key words in human motor development. *Physical Therapy*, 90(12), 1823–1837. doi:10.2522/ptj.20100006
- Haken, H. (1988). *Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems*. Berlin: Springer.
- Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research and Development*, 5(3), 183–191.
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 30(6), 718–729. doi:10.1016/j.neubiorev.2006.06.001
- Orlov, A. O., Lent, C. S., Thorpe, C. C., Boechler, G. P., & Snider, G. L. (2012). Experimental test of Landauer's Principle at the sub-kBT level. *Japanese Journal of Applied Physics*, 51(6S), 06FE10. doi:10.1143/JJAP.51.06FE10
- Sporns, O., & Edelman, G. M. (1993). Solving Bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Development*, 64(4), 960–981. doi:10.2307/1131321

■ **ДИСКУССИЯ** ■

Потенциальная вариативность нейронных сетей мозга в контексте идей Л. В. Крушинского

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ А. Л. КРУШИНСКОГО «ПЛАТА ЗА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ: БИОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ВОЗМОЖНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ»

Александр Каплан

Лаборатория нейрофизиологии и нейро-компьютерных интерфейсов, биологический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Аннотация. Обсуждаются идеи и концепции, изложенные в комментируемой статье А. Л. Крушинского. Делается акцент на идее о том, что каждый информационный акт нервной деятельности приводит к увеличению энтропии в нейронной сети, что требует ее исходной избыточной упорядоченности. Приводятся аргументы в пользу гипотезы Л. В. Крушинского о том, что исходная избыточность в мозгу реализована скорее в исходно большом числе нервных клеток, недифференцированных по своим связям. Однако указывается, что эта избыточность имеет свои нормативные рамки, за которыми могут наблюдаться патологические феномены.

Контактная информация: Александр Яковлевич Каплан, akaplan@mail.ru; Ленинские горы 1/12, Биологический факультет, 119992 Москва, Россия.

Ключевые слова: нейроны, мозг, избыточная упорядоченность, энтропия, информация

© 2015 Александр Каплан. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons “Attribution”](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2015 г. Принята в печать 29 марта 2015 г.

Замечательный зоопсихолог и эволюционист Леонид Викторович Крушинский в размышлениях о предпосылках элементарной рассудочной деятельности выдвинул гипотезу о том, что «...один из путей эволюции мозга, который мог привести к развитию системы адекватных форм поведения в новой для организма ситуации, — увеличение резерва избыточности нейронов с многообразной системой контактов между ними. Это и создает возможность для образования практически бесконечного числа нейронных ансамблей, которые в каждый данный момент могут выполнять роль своеобразных функциональных нейрональных центров» (Крушинский Л. В., 1986, с. 230).

В комментируемой статье А. Л. Крушинского делается попытка объяснить эту идею в терминах теории информации и термодинамики. Намек на прямую связь между информацией и энтропией содержится еще в знаменитом парадоксе Демона Джеймса Максвелла, якобы способного создавать перепад темпе-

ратур в замкнутой системе всего лишь переключением заслонки между сосудами для сортировки быстрых и медленных молекул. Снижение энтропии в замкнутой системе — явное нарушение второго закона термодинамики! Спустя более полувека легендарный венгерский физик Лео Сциллард разрешил этот парадокс. Он понял, что никакого повышения температуры в замкнутой системе не произойдет, потому что за сведения о скоростях молекул Демон Максвелла должен расплачиваться расходом энергии, то есть увеличением энтропии в системе, эквивалентным ее снижению за счет сортировки молекул. Так, задолго до Клода Шеннона, категория информации получила отражение в терминах термодинамики. Потом биофизики рассчитали, что энергетически информация стоит удивительно дешево. К примеру, чтобы в единственном варианте реализовать сеть нейронных контактов мозга макаки, состоящую примерно из 10^{13} уникальных синапсов, потребуется $I = \log_2(10^{13}) \approx 10^{13} \log_2 10^{13} = 4 \cdot 10^{14}$ бит

информации. Однако наведение порядка в такой гиперсети приводит к снижению энтропии системы всего на 10^{-9} энтропийных единиц (э. е.). Притом что повышение энтропии системы на 1 э. е. эквивалентно переходу в пар одного грамма воды (Блюменфельд, 1996).

Теоретический анализ проблемы с учетом идей Больцмана и Гиббсона о связи энтропии со статистической концепцией упорядоченности и неупорядоченности системы привел автора статьи А. Л. Крушинского к любопытному выводу по поводу стоимостного выражения информационно-аналитических актов нервной деятельности. Он полагает, что хотя повышение энтропии нейронной сети при каждом элементарном информационном акте незначительно, тем не менее мозгу, по-видимому, всегда необходимо иметь запас упорядоченности, чтобы при какой-нибудь очередной информационной нагрузке не свалиться в хаос. В какой-то мере этот вывод действительно «аналитически» объясняет интуитивную гипотезу Л. В. Крушинского о необходимой избыточности нейронов и контактов между ними для развивающегося и обучающегося мозга. Этот вывод А. Л. Крушинского также созвучен идеям цитируемого в статье Эрвина Шредингера о том, что «организм поддерживает себя постоянно на достаточно высоком уровне упорядоченности (равно на достаточно низком уровне энтропии)» (Шредингер, 1944/2002, с. 78).

Однако апелляция к основаниям термодинамики и теории информации в рассуждениях о механизмах нервной деятельности, хотя и имеет определенную эвристическую ценность, в значительной мере нивелируется тем обстоятельством, что реальный мозг человека и животных относится к категории открытых систем. В этом случае процессы диссипации энергии и динамики упорядоченности систем организма определяются закономерностями и стратегиями его жизнедеятельности без необходимости поддержания баланса расхода энергии. Строго говоря, мозг может «позволить себе» находиться на очень низком уровне упорядоченности без опасности перехода к термодинамическому хаосу. Так собственно и происходит в мозге новорожденного организма, когда нейроны имеются уже в полном комплекте, но остаются практически без связей между собой. Фактически на всем протяжении последующего развития мозг не только не имеет опережающей избыточности «порядка», но сам этот порядок в нейронной сети формируется с каждым новым актом информационной деятельности по мере накопления навыков и развития высших форм нервной деятельности. В этой связи более сильным представляется утверждение Л. В. Крушинского о необходимости для развития мозга «избыточности нейронов с многообразной системой контактов между ними» (Крушинский Л. В., 1986, с. 230), которое по сути дела не требует исходной высокой упорядоченности нейронной сети. Наоборот, именно изначальная неструктурированность или потенциальная многовариантность путей развития нейронной сети позволяет мозгу «лепить» упорядоченные конструкции под конкретные функциональные системы (Арбиб, 2004).

Интересно, что достаточно часто, до 3–5 случаев на 10 тысяч детей, и особенно в последние десятилетия, природа как-то особенно щедро, более чем наполовину

выше среднего (Courchesne et al., 2011), одаривает человека нейронами, в лобных областях коры больших полушарий головного мозга. Однако подобная сверхнормативная избыточность, причем не только нейронов, но и синапсов, почему-то негативно влияет на функции мозга, что фенотипически выражается в тяжелых аутистических расстройствах (Tang et al., 2014). Возможно, этой тенденции способствует широкое распространение антидепрессантов, которые помимо своего известного действия еще стимулируют нейрогенез (Malberg et al., 2000). В любом случае это заставляет задуматься о том, что при очевидной справедливости положений о необходимости изначальной «избыточности нейронов» биологические пределы этой избыточности, по-видимому, не слишком широки и, вероятно, строго определены эволюционной историей организма.

Автору настоящих комментариев к статье А. Л. Крушинского представляется особенно ценным его вывод о том, что «мозг обладает запасом упорядоченности, превосходящим информационную сложность решаемых им задач». Хотелось бы добавить к этой фразе только одно слово — «...потенциальной упорядоченности...», чтобы подчеркнуть приходящую от Л. В. Крушинского и от А. Л. Крушинского мысль о том, что восприятие физического мира и построение его ментальных моделей на основе нейронных сетей может быть настолько полным, насколько велико разнообразие потенциально возможных нейронных конфигураций мозга. Между тем, 86 млрд нейронов головного мозга человека (Herculano-Houzel, 2009) с 5–15 тысячами контактов для каждого нейрона составляют такую высокую комбинаторику вариантов нейронных конфигураций, которая вполне может отразить вариативность значимых для животных и человека параметров и объектов физического макромира.

Литература

- Арбиб М. Метафорический мозг. М.: Едиториал, 2004.
- Блюменфельд Л. А. Информация, термодинамика и конструкция биологических систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. No. 7. P. 88–92.
- Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности: эволюционные и физиолого-генетические аспекты поведения. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1986.
- Шредингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002.
- Courchesne E., Mouton P. R., Calhoun M. E., Semendeferi K., Ahrens-Barbeau C., Hallet M. J., Barnes C. C., Pierce K. Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism // The Journal of the American Medical Association. 2011. Vol. 306. No. 18. P. 2001–2010. doi:10.1001/jama.2011.1638
- Herculano-Houzel S. The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain // Frontiers in Human Neuroscience. 2009. Vol. 3. P. 31, 1–11. doi:10.3389/neuro.09.031.2009
- Malberg J. E., Eisch A. J., Nestler E. J., Duman R. S. Chronic antidepressant treatment increases neurogenesis in adult rat hippocampus // The Journal of Neuroscience. 2000. Vol. 20. No. 24. P. 9104–9110.
- Tang G., Gudsnuk K., Kuo S.-H., Cotrina M. L., Rosoklija G., Sosunov A., Sonders M. S., Kanter E., Castagna C., Yamamoto A., Yue Z., Arancio O., Peterson B. S., Champagne F., Dwork A. J., Goldman J., Sulzer D. Loss of mTOR-dependent macroautophagy causes autistic-like synaptic pruning deficits // Neuron. 2014. Vol. 83. No. 5. P. 1131–1143. doi:10.1016/j.neuron.2014.09.001

discussion

The Potential Variability of Neural Networks in the Context of L. V. Krushinsky's Ideas

COMMENTS ON A. L. KRUSHINSKY'S "THE COST OF PROBLEM SOLVING: BIOPHYSICAL BACKGROUND AND PROBABLE EVOLUTIONARY CONSEQUENCES"

Alexander Kaplan

Neuro-Computer Interfaces Laboratory, Faculty of Biology, Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. We discuss the concepts contained in the article by A.L. Krushinsky. We specifically focus on the idea that each informational act within a period of nervous activity leads to an increase in the entropy of the neural network, which requires an initial excessive orderliness. We present arguments in favor of the hypothesis proposed by L.V. Krushinsky, that initial redundancy is likely implemented in the brain as an originally large number of nerve cells, as yet undifferentiated by their connections. However, it is suggested that this redundancy has its normative values, the increase of which may lead to pathological phenomena.

Correspondence: Alexander Kaplan, akaplan@mail.ru; Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Leninskije Gory, 119992 Moscow, Russia

Keywords: neurons, brain, excessive orderliness, entropy, information

Copyright © 2015. Alexander Kaplan. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Received 27 March 2015, accepted 29 March 2015.

References

- Arbib, M. (1972). *The metaphorical brain: an introduction to cybernetics as artificial intelligence and brain theory*. New York: Wiley-Interscience.
- Blumenfeld, L. (1996). Information, thermodynamics, and the structural principles of biological systems. *Soros Educational Journal*, 7, 88–92.
- Courchesne, E., Mouton, P.R., Calhoun, M.E., Semendeferi, K., Ahrens-Barbeau, C., Hallet, M.J., Barnes, C.C., & Pierce, K. (2011). Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism. *The Journal of the American Medical Association*, 306(18), 2001–2010. doi:10.1001/jama.2011.1638
- Herculano-Houzel, S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 31, 1–11. doi:10.3389/neuro.09.031.2009
- Krushinsky, L. V. (1986). *[Biological basis of reasoning ability]*. Moscow: Moscow State University. (Russian).
- Malberg, J.E., Eisch, A.J., Nestler, E.J., & Duman, R.S. (2000). Chronic antidepressant treatment increases neurogenesis in adult rat hippocampus. *The Journal of Neuroscience*, 20(24), 9104–9110.
- Schrödinger, E. (1944). *What Is Life? : The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tang, G., Gudsnek, K., Kuo, S.-H., Cotrina, M.L., Rosoklija, G., Sosunov, A., Sonders, M.S., Kanter, E., Castagna, C., Yamamoto, A., Yue, Z., Arancio, O., Peterson, B.S., Champagne, F., Dwork, A.J., Goldman, J., & Sulzer, D. (2014). Loss of mTOR-dependent macroautophagy causes autistic-like synaptic pruning deficits. *Neuron*, 83(5), 1131–1143. doi:10.1016/j.neuron.2014.09.001

ДИСКУССИЯ

Жизнь как негэнтропийный информационный процесс

КРАТКИЕ КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ АЛЕКСЕЯ КРУШИНСКОГО «ПЛАТА ЗА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ: БИОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ВОЗМОЖНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ»

Александр Ратушняк

Лаборатория биомедицинской информатики, Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН

Аннотация. Представленный в статье «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия» анализ многоуровневых информационных систем только на верхнем уровне их организации представляется важным, но недостаточным. Для понимания принципов и механизмов работы таких систем необходимо интегрировать представления об эволюционных истоках молекулярных информационных процессов, лежащих в основе базовых функций понижения внутренней энтропии за счет предсказания.

Контактная информация: Александр Савельевич Ратушняк, ratush@kti.nsc.ru; ул. Акад. Ржанова 6, 630090 Новосибирск, Россия.

Ключевые слова: эволюция когнитивных функций, молекулярные информационные процессы, предсказание, опережающее отражение, информация, энтропия

© 2015 Александр Савельевич Ратушняк. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons “Attribution”](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2015 г. Принята в печать 26 марта 2015 г.

Статья посвящена анализу физических основ процессов в живой природе. Компактное изложение таких основ представляется весьма полезным. При этом в статье рассматривается в основном мозг как самый верхний уровень пирамиды функциональных систем, на основе которых функционирует любой живой организм. При анализе работы мозга рассматриваются, как правило, высшие когнитивные функции. Эти функции анализируются с биофизической точки зрения с возможностью описания работы мозга при помощи таких физических величин, как энергия и энтропия. По сути, эта задача является частью более общей проблемы понимания физических основ жизни и не решается отдельно от нее. В данной работе проведен достаточно интересный обзор существующих представлений и оригинальные интерпретации ряда из них.

Анализ работы многоуровневых информационных систем только на верхнем уровне их организации представляется недостаточным. Для понимания принципов и механизмов работы таких систем необходимо представление об эволюционных истоках возникновения их базовых функций. Возникновение живых систем стало возможным в силу наличия зоны устойчиво-

сти термодинамически открытых систем, внутренняя энтропия которых понижается на основе информационного процесса, базирующегося на предсказательных свойствах. Именно функция предсказательности является главным отличительным свойством любого живого организма. Эта функция неявно присутствует даже в простой модельной системе — «демоны Максвелла». Энтропия в одном из отсеков этой модели понижается в результате детекции (рецепции) перемещающейся частицы, анализа ее энергии и предсказания ее будущего положения в пространстве для открытия канала между отсеками в нужное время и в нужном месте. Вероятно, на основе примерно такого принципа возникли первичные молекулярные системы, послужившие основой эволюционного процесса. Такие молекулярные микробиоты, возникшие, по существующим представлениям, почти 4 млрд лет назад, вероятно, совершенствовались и усложнялись 3.5 млрд лет до кембрийского периода и только примерно 500 млн лет назад оказались способными к объединению в сообщества, к созданию многоклеточных организмов. Это привело к специализации, к появлению клеток, ориентированных на обработку информации, и, наконец, к образо-

ванию специализированного органа — мозга. Но, как и у первичных биот, основная функция этой системы осталась прежней. Уменьшение внутренней энтропии на основе предсказания. При этом время, на которое такое предсказание распространяется, естественно, увеличилось за счет количественного прироста рецепторных и обрабатывающих информацию структур. В процессе эволюции многоклеточных организмов усложнялись и совершенствовались опять же и прежде всего именно внутриклеточные молекулярные системы (например, Barbosa-Morais et al., 2012). Именно поэтому представляется, что реальный анализ физических свойств живых информационных систем необходимо вести, ориентируясь на простые молекулярные конструкции, осуществляющие информационные процессы, связанные с понижением энтропии на основе предсказания. В качестве таких конструкций можно рассматривать появившиеся данные и предположения о функциях, заложенных в рибосомальном аппарате (Root-Bernstein M., Root-Bernstein R., 2015). Однако в таком направлении можно рассматривать и многие другие клеточные конструкции, например специализированные рецептор-эффекторные комплексы синапсов (Nowak et al., 1984; Проскура и др., 2014; Ratushnyak et al., 2014).

При таком подходе не кажется нерешаемой задача о некотором «запасе», избытке упорядоченности, который должен быть в стартовой точке развития таких систем. Предельная простота таких молекулярных конструкций подразумевает и возможность их флуктуационного возникновения уже с некоторым «запасом». При этом такие системы должны обладать возможностью активно накапливать упорядоченность на основе, например, ассоциативного запоминания, создания ассоциированных молекулярных систем трансформируемых под постоянным «контролем» обратными связями с внешней средой. Оказавшись благодаря этому в зоне устойчивости, они могли и дальше накапливать упорядоченность, всегда балансируя между ее затратами на приобретение информации и расходом.

Взаимодействия в клетке множества молекулярных систем (с размерностью, вероятно, значительно превосходящей сейчас предполагаемую), каждая из которых работает по принципам, заложенным миллиарды лет назад, приводит к возникновению новых интегративных качеств, не свойственных отдельным компонентам, так называемых эмерджентных — системных качеств и функций. Объединение клеток в организме, возникновение их специализации и формирование мозга приводит к появлению функций, ориентированных на решение задач, связанных с долгосрочным предсказанием, памятью, вниманием, психомоторной координацией, речью, гнозисом, праксисом, счетом, мышлением, ориентацией, планированием и контролем высшей психической деятельности и др. (Роуз, 1995; Рамачандран, 2014).

На основе понимания физики этих молекулярных процессов представляется возможным создать «единую теорию жизни» и теорию работы мозга как многоуровневого комплекса базовых молекулярных элементов, работающих на основе принципа понижения внутренней энтропии за счет предсказания. Несомнен-

ный вклад в решение этих задач вносит статья Алексея Крушинского «Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия».

Литература

- Проскура А. Л., Вечканова С. О., Запара Т. А., Ратушняк А. С. Реконструкция молекулярного интерактома в системе глутаматных синапсов // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Vol. 18. No. 4/2. P. 1205–1218.
- Рамачандран В. Мозг рассказывает. Что делает нас людьми. М.: Карьера Пресс, 2014.
- Роуз С. Устройство памяти. От молекул к сознанию. М.: Мир, 1995.
- Barbosa-Morais N. L., Irimia M., Pan Q., Xiong H. Y., Gueroussov S., Lee L. J., Slobodeniuc V., Kutter C., Watt S., Çolak R., Kim T., Misquitta-Ali C. M., Wilson M. D., Kim P. M., Odom D. T., Frey B. J., Blencowe B. J. The evolutionary landscape of alternative splicing in vertebrate species // Science. 2012. Vol. 338. No. 6114. P. 1587–1593. doi:10.1126/science.1230612
- Nowack L., Bregestovski P., Ascher P., Herbert A., Prochiantz A. Magnesium gates glutamate-activated channels in mouse central neurons // Nature. 1984. Vol. 307. P. 462–465. doi:10.1038/307462a0
- Proskura A., Vechkapova S., Zapara T., Ratushnyak A. Reconstruction of the molecular interactome in the system of glutamatergic synapses // Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii. 2014. Vol. 18. No. 4/2. P. 1205–1218.
- Root-Bernstein M., Root-Bernstein R. The ribosome as a missing link in the evolution of life // Journal of theoretical biology. 2015. Vol. 367. P. 130–158. doi:10.1016/j.jtbi.2014.11.025
- Sucher N. J., Awobuluyi M., Choi Y.-B., Lipton S. A. NMDA receptors: from genes to channels // Trends in pharmacological sciences. 1996. Vol. 17. No. 10. P. 348–355. doi:10.1016/S0165-6147(96)80008-3

discussion

Life as a Negentropy Information Process

BRIEF COMMENTS ON ALEXEI KRUSHINSKY'S "THE COST OF PROBLEM SOLVING: BIOPHYSICAL BACKGROUND AND PROBABLE EVOLUTIONARY CONSEQUENCES"

Aleksandr Ratushniak

Laboratory of Biomedical Informatics, Design Technological Institute of Digital Techniques, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Abstract. In the article "The cost of problem solving: Biophysical background and probable evolutionary consequences" a multilevel analysis of information systems is carried out only at the top level of their organization, which is important but not sufficient. To understand the principles and mechanisms of the functioning of such systems, it is necessary to integrate ideas about the evolutionary origins of molecular information processes underlying the basic functions for reducing the internal entropy due to prediction.

Correspondence: Aleksandr Ratushniak, ratush@kti.nsc.ru, Acad. Rzhanova str., 6630090 Novosibirsk, Russia

Keywords: cognitive evolution, molecular information processes, prediction, anticipatory reflection, information, entropy, negentropy

Copyright © 2015. Aleksandr Ratushniak. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Received 25 March 2015, accepted 26 March 2015.

References

- Barbosa-Morais, N.L., Irimia, M., Pan, Q., Xiong, H. Y., Gueroussov, S., Lee, L. J., Slobodeniuc, V., Kutter, C., Watt, S., Çolak, R., Kim, T., Misquitta-Ali, C. M., Wilson, M. D., Kim, P. M., Odom, D. T., Frey, B. J., & Blencowe, B. J. (2012). The evolutionary landscape of alternative splicing in vertebrate species. *Science*, 338(6114), 1587–1593. [doi:10.1126/science.1230612](https://doi.org/10.1126/science.1230612)
- Nowack, L., Bregestovski, P., Ascher, P., Herbert, A., & Prochiantz, A. (1984). Magnesium gates glutamate-activated channels in mouse central neurons. *Nature*, 307, 462–465. [doi:10.1038/307462a0](https://doi.org/10.1038/307462a0)
- Proskura, A., Ratushnyak, A., & Zapara, T. (2014). The protein-protein interaction networks of dendritic spines in the early phase of long-term potentiation. *Journal of Computer Science and Systems Biology*, 7, 040–044. [doi:10.4172/jcsb.1000136](https://doi.org/10.4172/jcsb.1000136)
- Proskura, A., Vechkapova, S., Zapara, T., & Ratushnyak, A. (2014). Reconstruction of the molecular interactome in the system of glutamatergic synapses. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii*, 18(4/2), 1205–1218.
- Ramachandran, V. S. (2012). *The tell-tale brain: A neuroscientist's quest for what makes us human*. New York, London: WW Norton & Company.
- Root-Bernstein, M., & Root-Bernstein, R. (2015). The ribosome as a missing link in the evolution of life. *Journal of theoretical biology*, 367, 130–158. [doi:10.1016/j.jtbi.2014.11.025](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2014.11.025)
- Rose, S. (1993). *The making of memory: From molecules to mind*. London: Bantam Books.
- Sucher, N. J., Awobuluyi, M., Choi, Y.-B., & Lipton, S. A. (1996). NMDA receptors: from genes to channels. *Trends in pharmacological sciences*, 17(10), 348–355. [doi:10.1016/S0165-6147\(96\)80008-3](https://doi.org/10.1016/S0165-6147(96)80008-3)

■ научная жизнь ■

Обзор публикаций российских и белорусских исследователей в сфере когнитивной психологии и когнитивной науки за 2014 г.

Екатерина Сапего

Кафедра психологии, факультет философии и социальных наук, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Объединение естественных и гуманитарных наук до сих пор представляется непривычным, однако, конвергентный подход в развитии наук и технологий успешно реализуется в русскоязычном пространстве. С целью формирования у читателей журнала представления о современном состоянии развития когнитивной науки настоящий материал обобщает публикации авторов из России и Беларуси по данной тематике за 2014 г. Основной акцент в обзоре сделан на материале по когнитивной психологии и отдельных аспектах ее изучения: память, внимание, восприятие, мышление, интеллект, категоризация. Также рассматриваются материалы по психолингвистике, нейрофизиологии и другим смежным направлениям. На основе обобщения представленного материала делаются выводы об основных вопросах исследований в области когнитивной науки.

Контактная информация: Екатерина Сапего, miltcom@tut.by; кафедра психологии, факультет философии и социальных наук, Белорусский государственный университет, ул. Кальварийская, д. 9, к. 428, 220004 Минск, Беларусь.

Ключевые слова: когнитивная наука, когнитивная психология, актуальные тенденции, публикации, трансдисциплинарность, психофизиология, нейровизуализация, внимание, память, категоризация

© 2015 Екатерина Сапего. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution"](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. [всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2015 г. Принята в печать 30 марта 2015 г.

Настоящий обзор сформирован на основе анализа публикаций русскоязычных (российских и белорусских) исследователей в области когнитивной психологии и когнитивной науки за 2014 г. и отражает наиболее актуальные потребности и тенденции продвижения современных ученых в данной сфере. Материал включает описание серии научных сборников, отдельных глав книг, специальных выпусков журналов и статей в научных журналах, вышедших на территории России и Беларуси на русском языке. Также представлено несколько публикаций на английском языке, изданных в зарубежных странах.

При поиске и включении материала в обзор учитывалась тематика отбираемых статей, специфика и направление основных научных журналов, публикующих результаты исследований в области когнитивной науки («Экспериментальная психология», «Психологический журнал» ИП РАН, «Психология. Журнал

Высшей школы экономики», «Психологические исследования»), а также направления семинаров и конференций, выпустивших соответствующие сборники научных статей как в электронном, так и в печатном варианте.

По содержательному критерию отбора публикаций основными линиями в представленном обзоре выступили такие как: исследования в области когнитивной психологии (посвященные восприятию, вниманию, памяти, структуре интеллекта, эмоциональному интеллекту, аффективным процессам, вопросам категоризации, установления сходства и различия, решению задач), а также вопросы психолингвистики, психофизиологии и нейрокогнитивной парадигмы исследований. Представлены и обзорно-аналитические статьи, раскрывающие новые направления исследований в когнитивной науке, в том числе в связи с развитием информационных технологий.

В обзор не вошли материалы, опубликованные в «Российском журнале когнитивной науки», поскольку предполагается, что с ними читатели журнала уже знакомы. В связи с этим обзор представляет читателям этого журнала публикации из других источников. Так как обзор носит более общий характер, а некоторые специализации в области когнитивной науки требуют отдельного пристального рассмотрения, то не представлены статьи из медицинских журналов, посвященные различным прикладным аспектам в области медицины (к примеру, патологии когнитивных процессов при различных неврологических заболеваниях); также не освещаются работы из области когнитивной семантики, анализирующие отдельные концепты.

Книжные издания

Вышла в свет коллективная монография «Когнитивная психология: феномены и проблемы» (2014) под редакцией В. Ф. Спиридонова, состоящая из обзорных статей, посвященных современному состоянию когнитивной психологии. Книга представляет читателю проблемное поле психологических исследований познания и сознания. Описывается феноменология когнитивных процессов, сложившиеся в различных разделах когнитивной психологии теоретические позиции, гипотезы о механизмах функционирования и развития психики, а также методы и направления экспериментальных исследований. Рассмотрим подробнее несколько материалов, посвященных изучению движения, восприятия и мышления.

М. А. Емельянова, А. А. Скворцов, А. В. Власова и С. П. Сенющенков опубликовали статью «Изучение произвольных движений в современной зарубежной нейропсихологии: нейрокогнитивный подход», в которой описаны основные когнитивные модели праксиса с использованием методологии построения блоковых схем обработки информации и новые тенденции в развитии данных моделей: вопросы независимости путей переработки информации, проблемы динамического построения движения, образующие «точки роста» нейрокогнитивной парадигмы.

В работе «Мгновенное восприятие естественных сцен и объектов» И. С. Уточкин рассмотрел феномены мгновенного восприятия сложных сцен. Основным выводом, к которому он приходит, заключается в том, что уже на ранних этапах восприятия зрительных сцен человеку доступно достаточное количество информации, чтобы он мог воспринимать их смысл. Такой мгновенный образ отражает лишь глобальные свойства сцены и объектов в ней. Многие важные аспекты, связанные с характеристиками конкретных объектов, могут оставаться неосознанными. Поэтому мгновенное «схватывание» сути сцены не заменяет активного зрительного восприятия, предполагающего тщательное рассматривание и работу процессов внимания.

А. А. Котов в статье «Каузальное мышление у экспертов и новичков» на основании проведенного эмпирического исследования опытных и начинающих врачей-психиатров продемонстрировал большое количество отличий в представлениях о каузальности

и в процессах их использования, характерных для мышления экспертов и новичков. На основе причинно-следственных связей человек осуществляет действия прогноза и объяснения, может делать обобщения и переносить опыт в новые ситуации. Было обнаружено, что экспертность каузального мышления ограничена областью профессиональных знаний и перенос на другие области не осуществляется. Также было показано, что развитие профессионального мышления характеризуется не только возрастанием количества каузальных отношений в структуре знаний, но и возникновением новых стратегий использования каузальных знаний в различных ситуациях.

Также в коллективную монографию включены и другие интересные материалы: И. Ю. Владимиров, С. Ю. Коровкин «Рабочая память как система, обслуживающая мыслительный процесс»; В. В. Овсянникова, Т. А. Шабалина «Связь эффективности переработки эмоциональной информации с эмоциональными личностными характеристиками»; В. Ф. Спиридонов «Эксперты решают задачи»; Е. В. Печенкова, М. В. Фаликман «Когнитивная наука по обе стороны психофизической проблемы».

Опубликован шестой выпуск сборника научных трудов «Когнитивные исследования» под редакцией Б. М. Величковского, В. В. Рубцова и Д. В. Ушакова (2014), включающий четыре тематических раздела: «Общие вопросы когнитивной эволюции», «Внимание в процессах восприятия и коммуникации», «Нейрофизиологические основы когнитивной активности», «Научные обзоры „Когнитивных исследований“». В сборнике впервые широко представлены работы сотрудников Московского городского психолого-педагогического университета и Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Тематика материалов отражает традиционные для последнего десятилетия линии междисциплинарных исследований сознания, мозга и поведения. Присутствуют и работы, связанные с нейрокогнитивной парадигмой, являющейся актуальным вектором развития когнитивной науки в последнее время. В сборник включены публикации как на русском, так и на английском языках. Упомянем некоторые из статей русскоязычных авторов.

В материале «„Принцип востребованности“ в когнитивной системе человека» Е. А. Валуева, Д. В. Ушаков рассматривают тему эффективности повседневной когнитивной активности. Авторы предполагают, что коэффициент наследуемости для той или иной когнитивной функции, измеряемый в психогенетических исследованиях, определяется востребованностью этой функции со стороны среды. На материале проведенного исследования с использованием теста Векслера авторами получены данные, поддерживающие это предположение. Определяющим фактором развития интеллекта была признана окружающая среда как совокупность внешних условий активности человека.

В. А. Барабаничиков в статье «Направленность зора человека при восприятии эмоциональных экспрессий лица» представил результаты исследования с помощью метода регистрации движений глаз (айтрекинг). В ходе экспериментов с предъявлением испытуемым

фотоизображений человека, выражающих различные эмоции, были определены маршруты обзора лица и их устойчивость, связь с точностью узнавания выражаемых эмоциональных состояний. Приведенные данные имеют прикладное значение в плане коррекции различных аспектов межличностного восприятия.

Авторы Ю. И. Александров, А. Г. Горкин, А. А. Созинов, О. Е. Сварник, Е. А. Кузина и В. В. Гаврилов, опубликовавшие статью «Нейронное обеспечение научения и памяти» рассматривают аспекты развития и функционирования памяти, процессов научения с позиций системной физиологии. Процессы памяти рассматриваются с точки зрения нейронного обеспечения и структуры индивидуального опыта. Материал также включает схематическое описание этапов формирования памяти.

В публикации «Монотропизм внимания у детей с аутизмом: нейрофизиологические механизмы» Т. А. Строгановой, Е. В. Ореховой и И. А. Галютой проведен обзор исследований причин проявления аутизма. Предлагается подход к заявленной проблеме с позиций нейрофизиологии внимания, обсуждается предположение о причинах развития аутистических тенденций у детей с учетом нейрофизиологических механизмов.

С. Л. Шишкин, А. А. Федорова, Ю. О. Нуждин и Б. М. Величковский в работе «Управление роботом с помощью взгляда: коммуникативная парадигма» описали исследования механизмов управления робототехническим устройством с помощью взгляда. Новый подход основан на использовании коммуникативных возможностей при изучении движения глаз с применением айтрекинга (направления взгляда, ответной обратной связи от партнера по коммуникации). Проведенные эксперименты позволили внести вклад в развитие идей Л. С. Выготского о функционировании паттернов «совместного внимания».

Под редакцией М. В. Фаликман вышла глава в издании на английском языке «Cognition and Its Master: New Challenges for Cognitive Science» (Познание и его хозяин: Новые проблемы когнитивной науки) (2014), где обсуждается конвергенция в развитии когнитивной науки: появление таких новых исследовательских областей, как воплощенное познание, контекстно-обусловленное познание, эмоциональное познание, распределенное познание и новые исследования в области когнитивного развития и фундаментальных принципов культурно-исторической психологии. В публикации сделан акцент на культурно-историческом подходе в психологии, кратко прослеживается история чтения работ Л. С. Выготского в США и влияние этих работ на развитие когнитивной психологии на начальном этапе.

В Беларуси издан пятый выпуск научного сборника «Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований» (2014). Можно перечислить некоторые из публикаций, представляющих вопросы исследований интеллекта, категоризации и взаимодействия когнитивной науки с другими сферами научного познания.

А. П. Лобанов в статье «Интеллект: определения, теории, парадигмы» привел анализ развития и актуального состояния психологии интеллекта, основываясь на трех типах научных знаний: устаревшие, ведущие и инновационные. Автором выделена сфера актуальных знаний — факторно-аналитическая теория Кеттелла–Хорна–Кэрролла, которая объединяет парадигмы Спирмена–Гальтона и парадигму Бине и находит общие аспекты взаимосвязи между генетическими и средовыми факторами развития интеллекта. В завершении работы обосновывается положение о том, что исследования М. А. Холодной, предлагающие направление изучения «ментального опыта», представляют собой образец инновационного знания.

И. Н. Андреева выступила с обоснованием теоретико-эмпирической интегральной модели эмоционального интеллекта и его основных компонентов в публикации «Психологические характеристики инструментальных и индивидуально-личностных типов эмоционального интеллекта». Автором выделены описания типов эмоционального интеллекта, и в ходе исследования установлено, что представители межличностного типа характеризуются высокой социальной пластичностью и склонностью к доминированию, а для испытуемых с внутриличностным типом свойственны замкнутость, самостоятельность. «Стратегический» тип эмоционального интеллекта обладает креативностью, мечтательностью, а респонденты, принадлежащие к «опытному» типу, предрасположены к проявлению реалистичности и практичности.

В материале Н. П. Радчиковой «Вечные вопросы по поводу механизмов категоризации: „Сколько?“, „Какие?“, „Зачем?“» представлен обзор подходов к проблемам поиска механизмов категоризации. Рассматриваются современные тенденции исследований диссоциации между задачами определения сходства и категоризации.

Н. И. Миницкий представил публикацию «Диалог когнитивных практик в гуманитарном познании и образовании», описывающую трансцендентальные (всеобщие) концепты построения теоретического и методологического знания, а также формы его представления. В исследовании выделены основные формы когнитивного диалога, которые в качестве трансцендентальных концептов присущи гуманитарному, в том числе историческому, знанию и образованию.

Авторами А. В. Солодиловой и С. И. Чубаровым в материале «Когнитивные формы представления исторического знания (аспекты статики и динамики)» изложены вопросы когнитивной репрезентации, составляющие представление о статических и динамических состояниях деятельности в историческом познании, показано, каким образом следует преобразовывать и представлять статические (пассивные) и динамические (активные) знания с помощью когнитивных практик.

Журнальные публикации

Тематические выпуски журналов

Опубликован философско-литературный журнал «Логос» (№ 1, 2014), посвященный исследованиям в области когнитивной науки. Содержание журнала представили следующие материалы: О. Федорова «А и Б сидели на трубе, или Междисциплинарность когнитивных исследований»; П. Тагард «Междисциплинарность: торговые зоны в когнитивной науке»; А. Ноэ «Является ли видимый мир великой иллюзией?»; Т.В. Черниговская «„До опыта приобрели черты...“ Мозг человека и породивший его язык»; В. Ф. Спиридонов «Задачи, эвристики, инсайт и другие непонятные вещи»; В. Редько «Моделирование когнитивной эволюции: взгляд из искусственного интеллекта»; А. Ларцева «От генома до поведения: некоторые проблемы когнитивной генетики» и другие. В открывающей журнал статье М.В. Фаликман «Когнитивная наука: основоположения и перспективы» рассмотрена история становления направлений когнитивной науки и различных сфер ее развития до настоящего времени. В качестве примеров новейших направлений приводятся когнитивная поэтика — направление когнитивной лингвистики, идеи которой были описаны израильским исследователем Р. Цуром, и нейромагия — направление на стыке практики иллюзионистов, нейрофизиологии и психологии внимания, изучающее ошибки восприятия.

Издан специальный выпуск Вестника Московского университета, Серия 14. Психология (№ 3, 2014), посвященный памяти Е.Д. Хомской, отечественного нейропсихолога, создавшей новое направление — нейропсихологическую психофизиологию. В содержание журнала включены следующие статьи: М.С. Ковязина «Синдром „расщепленного“ мозга и факторы межполушарного взаимодействия»; Н.К. Корсакова «Нейропсихология внимания и задача Струпа»; А.Р. Агрис, Т.В. Ахутина, А.А. Корнеев «Варианты дефицита функций I блока мозга у детей с трудностями обучения»; О.А. Кроткова «Психофизическая проблема и асимметрия полушарий мозга».

Отдельные статьи в журналах

Новые направления когнитивных исследований

Авторами М.В. Фаликман и М. Коулом (2014) подготовлен обзор «Культурная революция» в когнитивной науке: от нейронной пластичности до генетических механизмов приобретения культурного опыта», в котором представлено интенсивно развивающееся направление когнитивных исследований на стыке культурной антропологии, генетики и экспериментальной психологии — «культурная нейронаука». Представлен теоретический и эмпирический анализ в рамках двух направлений исследований: изучение пластичности мозга при освоении культурного опыта и исследование мозговых и генетических коррелятов особенно-

стей внимания, памяти, восприятия у представителей западных и восточных культур. Выводы по результатам исследований согласуются с положениями культурно-исторической теории Л.С. Выготского.

Е.А. Сергиенко (2014) в публикации «Модель психического как парадигма познания социального мира» описана «модель психического» — структура знаний о психическом (внутреннем мире) человека. Научное направление изучения «модели психического» является методом изучения обыденного сознания, а также социального взаимодействия и познания. В материале представлена история возникновения подхода «модель психического», продемонстрированы примеры изучения модели психического у детей-сирот и модели психического как ментальной основы понимания телевизионной рекламы, описаны современные линии в развитии данного подхода.

Журнал «В мире науки» (Фридман, 2014) напечатал интервью с Б.М. Величковским и В.Л. Ушаковым (Курчатовский НБИКС-центр). В публикации раскрываются содержание прикладных исследований в области когнитивной науки, их роль в объединении гуманитарных и технических наук, современные частные методы исследований, рассказывается о методах нейровизуализации в исследовании мозговых функций и о получении данных о предрасположенности человека к нейродегенеративным заболеваниям.

Зрительное восприятие и внимание

Публикация И.С. Уточкина, Н.А. Тюриной «Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert» («Параллельное усреднение размера возможно, но ограничено по диапазону: ответ Маршану, Саймонсу и Де Фокерту» (2014) отражает результаты экспериментального исследования мгновенной оценки одной из так называемых зрительных статистик — среднего размера множества объектов, находящихся в поле зрения. Получены новые данные о возможности параллельного усреднения размера множества объектов при их зрительном восприятии. Показано, что одним из факторов, влияющих на возможность успешного усреднения, является диапазон разброса размеров. Чем меньше различия в размере между подмножествами внутри набора демонстрируемых объектов, тем больше вероятность их точного усреднения.

П.А. Ямцинина, М.Б. Кувалдина (2014) в материале «Исследование условия слепоты по невниманию методом вызванных потенциалов» описывают исследование феномена слепоты по невниманию, который проявляется в неспособности испытуемого заметить различимый объект в центральной части поля зрения, если его внимание занято анализом какого-либо другого параллельно предъявленного объекта. Также рассматриваются вопросы взаимосвязи зрительного осознания и функций внимания. Для этого авторы применили методику М. Коивисто, отдельно регистрируя в эксперименте с помощью вызванных потенциалов эффекты зрительного осознания и привлечения внимания к целевому стимулу. В заключении авторами формулируется вывод о причинах слепоты по невниманию.

Движение и рабочая память

А. А. Корнеевым и А. В. Курганским (2014) в материале «Влияние способа зрительного предъявления сложной траектории на временные параметры ее отсроченного двигательного воспроизведения» приводятся результаты исследования рабочей памяти и процессов усвоения предъявляемой информации для построения на ее основе двигательного ответа. В ходе эксперимента испытуемым предлагалось запоминать изображения траектории, состоящей из отрезков линии, и впоследствии воспроизводить ее направление на рисунке. Обнаружено, что способ зрительного предъявления информации, ее сенсорные характеристики влияют на характер удержания в рабочей памяти и временные параметры отсроченного двигательного воспроизведения зрительно-пространственного материала.

Процессы категоризации

В работе Н. П. Радчиковой, Е. А. Киштымовой «Проблема определения сходства в категоризации» (2014) описываются когнитивные механизмы категоризации в процессе обнаружения сходства окружающих объектов. Приводятся результаты экспериментов по выявлению способов категоризации, проводится сравнительный анализ принципов определения сходства.

По результатам серии экспериментов, описанных в статье А. А. Котова, Е. Ф. Власовой, Т. Н. Котовой «Как дети усваивают значение слов, которое недоступно их прямому восприятию: гипотеза о взаимодействии социального, языкового и понятийного опыта» (2014), сделаны выводы о различии в механизмах усвоения информации детьми трех и четырех лет. В частности, речь идет об усвоении недоступных прямому восприятию сведений о новых предметах. Младшие по возрасту дети, еще плохо знающие названия цветов, запоминали информацию о цвете экспериментального объекта только при непосредственном его восприятии, но не со слов экспериментатора. Однако дети постарше, владеющие названиями цветов, одинаково успешно запоминали новые данные как со слов взрослого, так и при прямом восприятии свойств предмета. В материале, таким образом, не находит своего подтверждения предположение П. Блума о том, что начиная с трех лет должно иметь место более эффективное усвоение ребенком новых сведений со слов взрослого, чем в результате непосредственного восприятия объекта.

Интеллект

А. П. Лобанов и А. В. Круглик (2014) в статье «Системный подход к восприятию пространства: от перцептивных структур к перцептивным способностям» представили результаты теоретического анализа восприятия пространства на основе иерархической модели интеллекта, а также данные эмпирического исследования перцептивных пространственных способностей. Авторами обосновано положение о том, что восприятие пространства обусловлено развитием индивидуальных ментальных репрезентаций и когнитивных структур, а также иерархией перцептивных способностей, представленных на уровне элементарных операций в структуре пространственного фактора интеллекта. Результаты исследования позволяют предотвращать

эффекты интерференции и когнитивный конфликт визуальной, аудиальной и кинестетической информации, могут быть применены при разработке образовательных технологий, принимающих во внимание характер репрезентативной системы обучающихся.

Е. В. Славутская и Л. А. Славутский (2014) в работе «Нейросетевой анализ взаимосвязи вербального и невербального интеллекта младших подростков» интегрировали знания из области информатики и психологии. Материал обосновывает предположение, что формирование взаимосвязей интеллектуальных показателей подростков зависит от их эмоционально-волевых и коммуникативных качеств. Метод нейросетевого анализа предлагает дополнительные возможности работы с психодиагностическими показателями по сравнению с традиционными статистическими методами. В частности, возможна работа с данными каждого из отобранных испытуемых и выявление нелинейных взаимосвязей между изучаемыми параметрами.

Язык и мышление

В вышедшей публикации В. Ф. Спиридонова, Э. В. Эриной «Возможности эмпирической проверки грамматической теории Н. Хомского» (2014) описывается предпринятая авторами попытка развития и пересмотра теории Н. Хомского. Рассматриваются вопросы происхождения и усвоения грамматических структур, в том числе вопрос о том, являются ли данные структуры основой для овладения иностранными языками. Результаты проведенных авторами экспериментов включают факты как в пользу рассматриваемой теории, так и против нее.

Взаимодействие эмоций и познания

Авторами публикации «Влияние интерпретации и узнавания объекта на его аффективную оценку: утка-белка, воспринимаемая как белка, мало чем отличается от белки обычной» А. А. Четвериковым, М. Г. Филипповой и Р. В. Черновым (2014) в ходе проведенной серии экспериментов изучен эффект влияния принятия решения об узнавании стимула на его оценку как более приятного, а также эффект изменения оценки при выборе одной из возможных интерпретаций предъявленного неоднозначного изображения. Было обнаружено, что от того, насколько успешно протекает взаимодействие с изображением, зависит и его аффективная оценка испытуемым.

Целью работы Т. А. Сысоевой «Теоретический анализ механизмов возникновения эмоционального эффекта Струпа» (2014) стало проведение теоретико-аналитического обзора исследований, посвященных изучению данного эффекта, заключающегося в замедлении при назывании цвета эмоциональных стимулов по сравнению с нейтральными. Выделены основные сложности эмпирических исследований механизмов эффекта, учет которых мог бы привести к улучшению результатов: использование качественно разного стимульного материала, отсутствие полного охвата возможных уровней независимых переменных, отсутствие анализа результатов на индивидуально-психологическом уровне, недостаточное количество критических экспериментов.

Публикация Р.И. Розовской, Е.В. Печенковой, Е.А. Меришиной, Р.И. Мачинской «фМРТ-исследование удержания в рабочей памяти изображений различной эмоциональной валентности» (2014) описывает отличия активации мозга при удержании в рабочей памяти неприятных (отрицательно эмоционально окрашенных) фотографий по сравнению с эмоционально нейтральными. Также было показано, что эффективность рабочей памяти, измеренная через успешность решения задачи поиска изменений на изображении, снижается для негативно эмоционально окрашенной информации по сравнению с нейтральной. По мнению авторов, это свидетельствует об изменении мозговой организации рабочей памяти в зависимости от эмоциональной окраски запоминаемого материала и о том, что отрицательная эмоциональная окраска информации препятствует формированию функциональных систем мозга, способствующих максимально эффективному функционированию рабочей памяти.

С.Ю. Коровкиным и О.С. Никифоровой (2014) проведена серия экспериментов, изучающих механизмы, лежащие в основе феномена юмористической фасилитации малых творческих (инсайтных) задач, описание которых нашло отражение в материале «Когнитивные и аффективные механизмы юмористической фасилитации решения творческих задач». Получено подтверждение наличия феномена юмористической фасилитации — при просмотре юмористических видеофрагментов перед выполнением творческих заданий отмечается рост темпа решения последних. Наибольший эффект на процесс выполнения заданий оказывает положительный аффективный компонент юмора, который необходим для ослабления субъективных ограничений при поиске решения и снижения критичности при выдвижении гипотез.

Таким образом, можно отметить, что когнитивные исследования в последнее время носят всё более междисциплинарный характер и отражают центральную тенденцию современной науки — процесс интеграции и трансдисциплинарности. Направления исследований объединяют многие отрасли знания, имеющие своими объектами изучения мозг и сознание. Появляется возможность ознакомиться с идеями авторов касательно применения когнитивных методов в педагогике, истории, математике и информатике.

Когнитивные эксперименты проводятся на стыке таких наук, как кибернетика, нейробиология и психофизиология, социальная антропология, филология, психология и психиатрия. Развиваются направления исследований в области нейроэкономики (механизмов принятия решений в различных социальных контекстах), нейронауки культуры (синтеза генетики, нейронауки и культурологии, исследующего культурные вариации в когнициях, эмоциях и мотивации, а также различия между культурами и индивидуальные различия между людьми внутри каждой культуры). Активно изучаются вопросы динамики нейрональных процессов, связанных с соотношением возбуждательных/тормозных процессов в различных частях коры, а также нервных сетей, вовлеченных в эти процессы; механизмы нейропластичности, психофизиологии и нейроби-

ологии языка и речи; аспекты математического моделирования — обработки мозгом поступающей сенсорной информации, а также когнитивных процессов и возникновения патологических состояний.

В исследованиях в сфере когнитивной психологии значительное место занимает изучение функций внимания, вопросы категоризации, структуры интеллекта, перцептивных способностей и зрительного восприятия, обнаружения сходства-различия объектов, механизмы эмоционально-когнитивного взаимодействия, функционирования рабочей памяти и когнитивной функции ориентации в пространстве (навигации) в мозге.

Также актуальным направлением выступают исследования влияния информационных технологий и использования сети Интернет на когнитивные функции человека; совершенствуются разработки в области искусственного интеллекта и робототехники, нейронных сетей, компьютерного зрения, виртуальной и дополненной реальности (образующейся в результате искусственного введения в поле восприятия новых сенсорных данных с целью дополнения сведений об окружении и улучшения восприятия информации). Таким образом, наблюдается тенденция к созданию антропоморфных технических систем, так как появляется возможность объединения методологии био- и информационных технологий с подходами и методами когнитивных наук, изучающих и моделирующих сознание человека, его познавательную деятельность.

Помимо изучения поведенческих (в том числе речевых) реакций человека в ответ на внешнее воздействие в настоящее время активно применяются методы исследования поведения животных и методы, выходящие за рамки поведенческих. Это методы молекулярной генетики, нейрофизиологические методы исследования мозга: ЭЭГ (электроэнцефалография), МЭГ (магнитоэнцефалография), фМРТ (функциональная магнитно-резонансная томография), ТМС (транскраниальная магнитная стимуляция), айтрекинг (метод регистрации движений глаз), GCTA (Genome-wide Complex Trait Analysis — инструмент комплексного анализа для генома).

Поэтому в заключение можно отметить, что когнитивную науку сегодня в равной степени можно отнести и к гуманитарной, и к естественной сфере научного познания.

Литература

Агрис А.Р., Ахутина Т.В., Корнеев А.А. Варианты дефицита функций I блока мозга у детей с трудностями обучения // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2014. № 3. С. 34–46. URL: http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf

Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В. Нейронное обеспечение научения и памяти // Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6. / Под ред. Б.М. Величковского, В.В. Рубцова, Д.В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. С. 130–169.

Андреева И.Н. Психологические характеристики инструментальных и индивидуально-личностных типов эмоционального интеллекта // Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных

исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Барабаничиков В. А. Направленность взгляда человека при восприятии эмоциональных экспрессий лица // Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6 / Под ред. Б. М. Величковского, В. В. Рубцова, Д. В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. С. 64–81.

Валуева Е. А., Ушаков Д. В. «Принцип востребованности» в когнитивной системе человека // Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6 / Под ред. Б. М. Величковского, В. В. Рубцова, Д. В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. С. 34–48.

Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2014. № 3. С. 3–62. URL: http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf

Владимиров И. Ю., Коровкин С. Ю. Рабочая память как система, обслуживающая мыслительный процесс // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 8–21.

Емельянова М. А., Скворцов А. А., Власова А. В., Сенюченко С. П. Изучение произвольных движений в современной зарубежной нейропсихологии: нейрокогнитивный подход // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 22–41.

Ковязина М. С. Синдром «расщепленного» мозга и факторы межполушарного взаимодействия // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2014. № 3. С. 18–25. URL: http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf

Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6 / Под ред. Б. М. Величковского, В. В. Рубцова, Д. В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014.

Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Корнеев А. А., Курзанский А. В. Влияние способа зрительного предъявления сложной траектории на временные параметры ее отсроченного двигательного воспроизведения // Психологические исследования. 2014. Т. 7. № 37. С. 11. URL: <http://psystudy.ru/index.php/num/2014v7n37/1045-korneev37.html>

Коровкин С. Ю., Никифорова О. С. Когнитивные и аффективные механизмы юмористической фасилитации решения творческих задач // Экспериментальная психология. 2014. Т. 7. № 4. С. 37–51.

Корсакова Н. К. Нейропсихология внимания и задача Струпа // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2014. № 3. С. 26–33. URL: http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf

Котов А. А. Каузальное мышление у экспертов и новичков // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 87–107.

Котов А. А., Власова Е. Ф., Котова Т. Н. Как дети усваивают значение слов, которое недоступно их прямому восприятию: гипотеза о взаимодействии социального, языкового и понятийного опыта // Культурно-историческая психология. 2014. Т. 10. № 2. С. 50–57.

Кроткова О. А. Психофизическая проблема и асимметрия полушарий мозга // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2014. № 3. С. 47–62. URL: http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf

Ларцева А. От генома до поведения: некоторые проблемы когнитивной генетики // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 155–170. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Лобанов А. П. Интеллект: определения, теории, парадигмы // Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Лобанов А. П., Круглик А. В. Системный подход к восприятию пространства: от перцептивных структур к перцептивным способностям // Вестник Гродненского гос. ун-та им. Я. Купалы. Серия 3. Филология. Педагогика. Психология. 2014. Т. 179. № 2. С. 103–108.

Миницкий Н. И. Диалог когнитивных практик в гуманитарном познании и образовании // Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Ноэ А. Является ли видимый мир великой иллюзией? // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 61–78. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Овсянникова В. В., Шабалина Т. А. Связь эффективности переработки эмоциональной информации с эмоциональными личностными характеристиками // Когнитивная психология: феномены и проблемы. / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 161–171.

Печенкова Е. В., Фаликман М. В. Когнитивная наука по обе стороны психофизической проблемы // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 229–255.

Радчикова Н. П. Вечные вопросы по поводу механизмов категоризации: «Сколько?», «Какие?», «Зачем?» // Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Радчикова Н. П., Киштымова Е. А. Проблема определения сходства в категоризации // Экспериментальная психология. 2014. Т. 7. № 2. С. 49–63.

Редько В. Моделирование когнитивной эволюции: взгляд из искусственного интеллекта // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 109–140. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Розовская Р. И., Печенкова Е. В., Меришина Е. А., Мачинская Р. И. фМРТ-исследование удержания в рабочей памяти изображений различной эмоциональной валентности // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 1. С. 27–48.

Сергиенко Е. А. Модель психического как парадигма познания социального мира // Психологические исследования. 2014. Т. 7. № 36. С. 6. URL: <http://psystudy.ru/index.php/num/2014v7n36/1017-sergienko36.html>

Славутская Е. В., Славутский Л. А. Нейросетевой анализ взаимосвязи вербального и невербального интеллекта младших подростков // Психологический журнал. 2014. Т. 35. № 5. С. 28–36.

Солодолова А. В., Чубаров С. И. Когнитивные формы представления исторического знания (аспекты статики и динамики) // Когнитивные штудии: современная психология в контексте трансдисциплинарных исследований. Материалы V междисциплинарного семинара. Вып. 5 / Под ред. А. П. Лобанова, Н. П. Радчиковой. Мн.: БГПУ им. М. Танка, 2014. URL: http://mmpi.by/?page_id=10

Спиридонов В. Ф. Когнитивная психология: феномены и проблемы. М.: Ленанд, 2014.

Спиридонов В. Ф. Эксперты решают задачи // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 108–130.

Спиридонов В. Ф. Задачи, эвристики, инсайт и другие непонятные вещи // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 97–108. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Спиридонов В. Ф., Эзрина Э. В. Возможности эмпирической проверки грамматической теории Н. Хомского // Вестник РГГУ. Серия Филологические науки. Языкознание. Московский лингвистический журнал. 2014. Т. 16. № 8. С. 162–180.

Строганова Т. А., Орехова Е. В., Галюта И. А. Монотропизм внимания у детей с аутизмом: нейрофизиологические механизмы // Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6 / Под ред. Б. М. Величковского, В. В. Рубцова, Д. В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. С. 221–260.

Сысоева Т. А. Теоретический анализ механизмов возникновения эмоционального эффекта Струпа // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 1. С. 49–65.

Тагард П. Междисциплинарность: торговые зоны в когнитивной науке // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 35–60. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Уточкин И. С. Мгновенное восприятие естественных сцен и объектов // Когнитивная психология: феномены и проблемы / Под ред. В. Ф. Спиридонова. М.: Ленанд, 2014. С. 70–86.

Фаликман М. В. Когнитивная наука: основоположения и перспективы // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 1–18. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Фаликман М. В., Коул М. «Культурная революция» в когнитивной науке: от нейронной пластичности до генетических механизмов приобретения культурного опыта // Культурно-историческая психология. 2014. Т. 10. № 3. С. 4–18.

Федорова О. А и Б сидели на трубе, или Междисциплинарность когнитивных исследований // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 19–34. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Фридман В. Гуманитарное погружение в естественно-научную среду // В мире науки. 2014. № 3. С. 35–39.

Черниговская Т. В. «До опыта приобрели черты...» Мозг человека и породивший его язык // Философско-литературный журнал «Логос». 2014. Т. 97. № 1. С. 79–98. URL: <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>

Четвериков А. А., Филиппова М. Г., Чернов Р. В. Влияние интерпретации и узнавания объекта на его аффективную оценку: утка-белка, воспринимаемая как белка, мало чем отличается от белки обычной // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 1. С. 66–85.

Шишкин С. Л., Федорова А. А., Нурдин Ю. О., Величковский Б. М. Управление роботом с помощью взгляда: коммуникативная парадигма // Когнитивные исследования: сборник научных трудов. Вып. 6 / Под ред. Б. М. Величковского, В. В. Рубцова, Д. В. Ушакова. М.: Издательство ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. С. 105–129.

Ямичкина П. А., Кувалдина М. Б. Исследование условия слепоты по невниманию методом вызванных потенциалов // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 4. С. 158–174.

Falikman M. Cognition and its master: new challenges for cognitive science // Cambridge Handbook of Cultural-Historical Psychology / R. Yasnitsky, A. van der Veer, M. Ferrari (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014. P. 104–115.

Utochkin I. S., Tiurina N. A. Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert // Acta Psychologica. 2014. Vol. 146. P. 7–18.

current state of the field

Russian and Belarusian Research in Cognitive Psychology and Cognitive Science: a 2014 summary

Katerina Sapeha

Department of psychology, Faculty of philosophy and social sciences, Belarussian state university, Minsk, Belarus

Abstract. Although it is unusual to combine the fields of natural science and the humanities, a convergent approach to science and technology is developing in Russian-speaking communities. The present review summarizes publications by authors from Russia and Belarus on the subject for 2014. The main emphasis is on cognitive psychology and its individual topics: memory, attention, perception, thinking, intelligence and categorization. Materials on cognitive psycholinguistics, neurophysiology and other related fields are also considered. The generalization of the material allows us to draw some conclusions about the main research questions in the field of cognitive science.

Correspondence: Katerina Sapeha, miltcom@tut.by; Kalvariiskaia str., 9–428, 220004 Minsk, Belarus

Keywords: cognitive science, cognitive psychology, transdisciplinarity, psychophysiology, neuroimaging, attention, memory, categorization

Copyright © 2015. Katerina Sapeha. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Received 22 February 2015, accepted 30 March 2015.

References

- Agris, A. R., Akhutina, T. V., & Korneev, A. A. (2014). [Varieties of Unit I functions deficits in children with the risk of learning disabilities]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya*, (3), 34–46. (Russian). Retrieved from http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf
- Alexandrov, Y. I., Gorkin, A. G., Sozinov, A. A., Svarnik, O. E., Kuzina, E. A., & Gavrilov, V. V. (2014). [Neuronal subserving of learning and memory]. In B. M. Velichkovsky, V. V. Rubtsov, & D. V. Ushakov (Eds.), *Cognitive studies*. Vol. 6 (pp. 130–169). Moscow: MSUPE. (Russian).
- Andreeva, I. N. (2014). Psikhologicheskie kharakteristiki instrumentalnykh i individualno-lichnostnykh tipov emocionalnogo intellekta [Psychological characteristic of the instrumental and personal-oriented types of the emotional intelligence]. In A. P. Lobanov, & N. P. Radchikova (Eds.), *Kognitivnye shchudii: sovremennaya psikhologiya v kontekste transdisiplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5 [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5]*. Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmmpi.by/?page_id=10
- Barabanshikov, V. (2014). [Gaze direction in perceiving emotional facial expressions]. In B. M. Velichkovsky, V. V. Rubtsov, & D. V. Ushakov (Eds.), *Cognitive studies*. Vol. 6 (pp. 64–81). Moscow: MSUPE. (Russian).
- Chernigovskaya, T. V. (2014). ["Prior to any learning acquired their traits..."] Human brain results from language]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 79–98. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Chetverikov, A. A., Filippova, M. G., & Chernov, R. V. (2014). Vliyanie interpretatsii i uznvaniya ob'ekta na ego afektivnyuyu otsenku: utka-belka, vosprinimaemaya kak belka, malo chem otlichaetsya ot belki obychnoi [Influence of object interpretation and recognition on its affective ratings: A squirrel-duck perceived as a squirrel is not much different from a normal squirrel]. *Psychology. Journal of Higher School of Economics*, 11(1), 66–85. (Russian).
- Emelyanova, M. A., Skvortsov, A. A., Vlasova, A. V., & Senyushchenkov, S. P. (2014). Izuchenie proizvolnykh dvizhenij v sovremennoj zarubezhnoj neiropsikhologii: neirokognitivny podkhod [Research on the voluntary movement in contemporary neuropsychology abroad: a neurocognitive approach]. In V. F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems]* (pp. 22–41). Moscow: Lenand. (Russian).
- Falikman, M. (2014). Cognition and its master: new challenges for cognitive science. In R. Yasnitsky A. van der Veer, & M. Ferrari (Eds.), *Cambridge Handbook of Cultural-Historical Psychology* (pp. 104–115). Cambridge: Cambridge University Press.

- Falikman, M. V. (2014). [Cognitive science: its foundations and challenges]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 1–18. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Falikman, M. V., & Cole, M. (2014). ["Cultural revolution" in cognitive science: from neuroplasticity to genetic mechanisms of acculturation]. *Cultural-historical psychology*, 10(3), 4–18. (Russian).
- Fedorova, O. (2014). [A and B were sitting on a pipe, or interdisciplinarity of cognitive studies]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 19–34. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Fridman, V. (2014). Gumanitarnoe pogruchenie v estestvennonauchnuju sredu [Humanitarian exposure to the natural science environment]. *V mire nauki*, (3), 35–39. (Russian).
- Iamshchinina, P. A., & Kuvaldina, M. B. (2014). [An ERP study of inattention blindness condition]. *Psychology. Journal of Higher School of Economics*, 11(4), 158–174. (Russian).
- Korneev, A. A., & Kurgansky, A. V. (2014). [The impact of a mode of visual presentation of a complex trajectory on reaction time scores in delayed response task]. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, 7(37), 11. (Russian). Retrieved from <http://psystudy.ru/index.php/num/2014v7n37/1045-korneev37.html>
- Korovkin, S. Y., & Nikiforova, O. S. (2014). [Cognitive and affective mechanisms of creative problems solving facilitation by humor]. *Experimental Psychology (Russia)*, 7(4), 37–51. (Russian).
- Korsakova, N. K. (2014). [Neuropsychology of attention and Stroop task]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya*, (3), 26–33. (Russian). Retrieved from http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf
- Kotov, A. A. (2014). Kauzalnoe myshlenie u ekspertov i novichkov [Causal reasoning in experts and novices]. In V. F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy* [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems] (pp. 87–107). Moscow: Lenand. (Russian).
- Kotov, A. A., Vlasova, E. F., & Kotova, T. N. (2014). [How children acquire meaning of the word that is beyond their direct perception: A hypothesis on social, language and conceptual experience interaction]. *Cultural-Historical Psychology*, 10(2), 50–57. (Russian).
- Kovyazina, M. S. (2014). ["Split" brain syndrome and factors of hemispheric interaction]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya*, (3), 18–25. (Russian). Retrieved from http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf
- Krotkova, O. A. (2014). [Psychophysical problem and the hemispheric asymmetry]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya*, (3), 47–62. (Russian). Retrieved from http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf
- Lartseva, A. (2014). [From genes to behavior: What can cognitive genetics tell us?]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 155–170. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Lobanov, A. P. (2014). Intellekt: opredeleniya, teorii, paradigmy [Intelligence: definitions, theories paradigms]. In A. P. Lobanov, & N. P. Radchikova (Eds.), *Kognitivnye shtudii: sovremennaya psikhologiya v kontekste transdisciplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5* [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5] Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmpi.by/?page_id=10
- Lobanov, A. P., & Kruglik, A. V. (2014). Sistemny podkhod k vospriyatiyu prostranstva: ot pertseptivnykh struktur k pertseptivnym sposobnostyam [System approach to perception of space: from perceptual structures to perceptual abilities]. *Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 3. Pedagogics. Psychology*, 179(2), 103–108. (Russian).
- Lobanov, A. P., & Radchikova, N. P. (Eds.). (2014). *Kognitivnye shtudii: sovremennaya psikhologiya v kontekste transdisciplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5* [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5] Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmpi.by/?page_id=10
- Minitsky, N. I. (2014). Dialog kognitivnykh praktik v gumanitarnom poznanii i obrazovanii [Dialog of cognitive practices in Cognition and education in humanities]. In A. P. Lobanov, & N. P. Radchikova (Eds.), *Kognitivnye shtudii: sovremennaya psikhologiya v kontekste transdisciplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5* [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5]. Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmpi.by/?page_id=10
- Noë, A. (2014). [Is the visual world a grand illusion?] Translation into Russian. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 61–78. Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Ovsyannikova, V. V., & Shabalina, T. A. (2014). Svjaz' jeffektivnosti pererabotki jemocional'noj informacii s jemocional'nymi lichnostnymi harakteristikami [Correlation of the effective processing of the emotional information with emotional-related personality traits]. In V. F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy* [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems] (pp. 161–171). Moscow: Lenand. (Russian).
- Pechenkova, E. V., & Falikman, M. V. (2014). Soznanie i mozg: kognitivnaia nauka po obe storony psikhofizicheskoi problemy [Consciousness and Brain: Cognitive Science on Both Sides of the Mind-Body Problem]. In V. F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy* [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems] (pp. 229–255). Moscow: Lenand. (Russian).
- Radchikova, N. P. (2014). Vechnye voprosy po povodu mekhanizmov kategorizacii: «Skol'ko?», «Kakie?», «Zachem?» [Old questions on mechanisms of categorization: what, how many and what for?]. In A. P. Lobanov, & N. P. Radchikova (Eds.), *Kognitivnye shtudii: sovremennaya psikhologiya v kontekste transdisciplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5* [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5]. Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmpi.by/?page_id=10
- Radchikova, N. P., & Kishtymova, E. A. (2014). [The problem of similarity assessment in categorization process]. *Experimental Psychology (Russia)*, 7(2), 49–63. (Russian).
- Red'ko, V. (2014). [Modeling of cognitive evolution: view from artificial intelligence]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 109–140. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Rozovskaya, R. I., Pechenkova, E. V., Meršina, E. A., & Machinskaya, R. I. (2014). fMRT-issledovanie uderzhaniya v rabochey pamyati izobrazhenii razlichnoi emotsional'noi valentnosti [fMRI Study of Retention of Images with Different Emotional Valence in the Working Memory]. *Psychology. Journal of Higher School of Economics*, 11(1), 27–48. (Russian).
- Sergienko, E. (2014). [Theory of Mind as a paradigm of social cognition]. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, 7(36), 6. (Russian). Retrieved from <http://psystudy.ru/index.php/num/2014v-7n36/1017-sergienko36.html>
- Shishkin, S. L., Fedorova, A. A., Nuzhdin, Y. O., & Velichkovsky, B. M. (2014). [Gaze-based control in robotics: The communicative paradigm]. In B. M. Velichkovsky, V. V. Rubtsov, & D. V. Ushakov (Eds.), *Cognitive studies*. Vol. 6 (pp. 105–129). Moscow: MSUPE. (Russian).
- Slavutskaya, E. V., & Slavutsky, L. A. (2014). Nejrosetevoj analiz vzaimosvjazi verbal'nogo i neverbal'nogo intellekta mladshih podrostkov [Neural network analysis of the relations between the verbal and nonverbal Intelligence in adolescents]. *Psikhologicheskii zhurnal*, 35(5), 28–36. (Russian).
- Solodilova, S. A., & Chubarov, S. I. (2014). Kognitivnye formy predstavleniya istoricheskogo znaniya (aspekty statiki i dinamiki) [Cognitive forms of historical knowledge (static and dynamical aspects)]. In A. P. Lobanov, & N. P. Radchikova (Eds.), *Kognitivnye shtudii: sovremennaya psikhologiya v*

- kontekste transdistsiplinarnykh issledovaniy. Vyp. 5 [Cognitive studies: contemporary psychology in the context of transdisciplinary research. Proceedings. Vol. 5].* Minsk: M. Tank BSPU. (Russian). Retrieved from http://mmpi.by/?page_id=10
- Spiridonov, V.F. (2014). Eksperty reshayut zadachi [Experts solve the problems]. In V.F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems]* (pp. 108–130). Moscow: Lenand. (Russian).
- Spiridonov, V.F. (2014). *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems]*. Moscow: Lenand. (Russian).
- Spiridonov, V.F. (2014). [Problems, heuristics, insight and other strange things]. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 97–108. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Spiridonov, V.F., & Ezrina, E.V. (2014). [Empirical verification of N. Chomsky's early theory of grammar]. *RSUH/RGGU bulletin. Series: Philology. Linguistic Studies. Moscow Journal of Linguistics*, 16(8), 162–180. (Russian).
- Stroganova, T.A., Orekhova, E.V., & Galuta, I.A. (2014). [Neural underpinnings of attention monotropism in children with autism spectrum disorders]. In B.M. Velichkovsky, V.V. Rubtsov, & D.V. Ushakov (Eds.), *Cognitive studies. Vol. 6* (pp. 221–260). Moscow: MSUPE. (Russian).
- Sysoeva, T.A. (2014). Teoreticheskii analiz mekhanizmov vozniknoveniya emotsional'nogo efekta Strupa [Theoretical analysis of emotional Stroop effect mechanisms]. *Psychology. Journal of Higher School of Economics*, 11(1), 49–65. (Russian).
- Thagard, P. (2014). [Being interdisciplinary: Trading zones in cognitive science]. Translation into Russian. *Logos. Philosophical and literary journal*, 97(1), 35–60. (Russian). Retrieved from <http://www.intelros.ru/readroom/logos/lo1-2014>
- Utochkin, I.S. (2014). Mgnovennoe vospriyatie estestvennykh scen i ob'ektov [Instantaneous perception of natural scenes and objects]. In V.F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems]* (pp. 70–86). Moscow: Lenand. (Russian).
- Utochkin, I.S., & Tiurina, N.A. (2014). Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert. *Acta Psychologica*, 146, 7–18.
- Valuyeva, E.A., & Ushakov, D.V. (2014). [“Demand principle” in human cognitive system]. In B.M. Velichkovsky, V.V. Rubtsov, & D.V. Ushakov (Eds.), *Cognitive studies. Vol. 6* (pp. 34–48). Moscow: MSUPE. (Russian).
- Velichkovsky, B.M., Rubtsov, V.V., & Ushakov, D.V. (Eds.). (2014). *Cognitive studies. Vol. 6*. Moscow: MSUPE. (Russian).
- Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya* (2014). (3), 3–62. (Russian). Retrieved from http://www.psy.msu.ru/science/vestnik/archive/vestnik_2014-3.pdf
- Vladimirov, I.Y., & Korovkin, S.Y. (2014). Rabochaya pamyat kak sistema, obsluzhivayushchaya myslitelny protsess [Working memory as a system that subserves problem solving]. In V.F. Spiridonov (Ed.), *Kognitivnaya psikhologiya: Fenomeny i problemy [Cognitive Psychology: Phenomena and Problems]* (pp. 8–21). Moscow: Lenand. (Russian).