

Воплощенное познание в образовании: возможности и ограничения гибридных репрезентаций

Н.И. Логинов

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5994-4191>, e-mail: lognikita@yandex.ru

А.О. Мадни

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-9980>, e-mail: jaf@life.ru

В.Ф. Спиридонов

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>, e-mail: vfspiridonov@yandex.ru

Целью данного обзора является систематизация теоретико-экспериментальных исследований в одном из доменов области, именуемой «Воплощенное познание». Все они связаны с решением прикладных задач в области образования, но также направлены и на выявление возможностей и ограничений в использовании предлагаемых методов и полученных результатов. Психологические исследования, обсуждаемые в обзоре, предлагают целый набор инструментов, которые могут быть использованы в учебном процессе с целью повышения его прицельности и эффективности. Мы рассмотрим одну из наиболее разработанных тем — соотношение абстрактных понятий в математике или дисциплинах естественнонаучного цикла с конкретным содержанием перцептивных репрезентаций обучающегося. Подход «Воплощенное познание» позволяет выявить закономерности, обуславливающие эффективность использования различных типов визуализаций (схем, чертежей, карт, графиков, диаграмм и т. д.), в процессе освоения конкретной области знаний. В качестве итога обсуждаются перспективы использования понятия гибридных репрезентаций, сочетающих в себе модальные (перцептивные) и амодальные компоненты, для объяснения внутренней механики опосредствования понятийного мышления.

Ключевые слова: воплощенное познание, научение, когнитивная психология, гибридные репрезентации, укорененное познание, визуализация, образование.

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы по государственному заданию РАНХиГС.

Для цитаты: Логинов Н.И., Мадни А.О., Спиридонов В.Ф. Воплощенное познание в образовании: возможности и ограничения гибридных репрезентаций // Культурно-историческая психология. 2022. Том 18. № 2. С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.17759/chp.2022180202>

Embodied Cognition in Education: Possibilities and Limitations of Hybrid Representations

Nikita I. Loginov

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5994-4191>, e-mail: lognikita@yandex.ru

Anna O. Madni

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-9980>, e-mail: jaf@life.ru

Vladimir F. Spiridonov

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>, e-mail: vfspiridonov@yandex.ru

The main purpose of this review is to systematize theoretical and experimental research in one of the areas of the field “Embodied Cognition”, aimed at solving applied problems in the field of education, as well as identifying the main opportunities and limitations in using the results obtained. The numerous experimental evidence and new explanatory models that have emerged within the framework of this approach open up a wide range of opportunities for new practices in education. This field offers a whole set of tools that can be used in the pedagogical process in order to increase its purposefulness and effectiveness. We will consider one of the most developed topics – the correlation of abstract concepts in mathematics or disciplines of the natural science spectrum with the specific content of perceptual representations of the student. The approach of embodied cognition allows us to identify the patterns that determine the effectiveness of using various types of visualizations (diagrams, drawings, maps, graphs, diagrams, etc.) in the process of mastering a specific field of knowledge. As a result, the prospects of using the concept of hybrid representations, combining modal perceptual and amodal components, to explain the internal mechanics of the mediation of conceptual thinking are discussed.

Keywords: embodied cognition, learning, cognitive psychology, hybrid representations, grounded cognition, visualization, education.

Funding. The article was written on the basis of the RANEPА state assignment research programme.

For citation: Loginov N.I., Madni A.O., Spiridonov V.F. Embodied Cognition in Education: Possibilities and Limitations of Hybrid Representations. *Kul'turno-istoricheskaya psikhologiya = Cultural-Historical Psychology*, 2022. Vol. 18, no. 2, pp. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.17759/chp.2022180202> (In Russ.).

Введение

На данный момент существует большое количество теоретических моделей и эмпирических фактов, свидетельствующих о важной роли сенсомоторной активности организма в функционировании когнитивных процессов [более подробно см.: 1; 2; 3]. Подход «Воплощенное познание», опирающийся на эти свидетельства, занял свое законное место в области фундаментальных исследований. И теперь его сторонники стараются ответить на закономерный вопрос о том, каким образом полученные результаты могут быть использованы в прикладных областях. Одной из интригующих сфер практики является образование, где часто возникает проблема освоения учащимися абстрактного материала. Особенно эта трудность характерна для естественнонаучных и математических учебных дисциплин. Представляется, что для преодоления именно таких сложностей ресурсы подхода «Воплощенное познание» являются наиболее удобными и эффективными.

Среди исследований в области воплощенного познания наиболее разработанным и разветвленным является подход, получивший название «Укорененное познание». С одной стороны, подобная ситуация вызвана большим количеством предложенных эвристических экспериментальных методов (например, парадигмы «Стоимость переключения» или «Верификация признаков»); с другой стороны, данное направление является теоретически наименее радикальным в рамках всех разновидностей Воплощенного познания и его значительно проще сопоставлять с теориями и фактами, полученными в русле более традиционных когнитивных исследований. Именно поэтому мы сконцентрируемся на Укорененном познании. Основ-

ной целью данного обзора является систематизация теоретико-экспериментальных исследований, реализованных в рамках этого подхода и направленных на решение прикладных задач в области образования, а также выявление основных возможностей и ограничений в использовании полученных результатов.

Сначала мы кратко охарактеризуем основные идеи, составляющие ядро названного подхода. Одна из наиболее эвристически ценных идей в его русле связана с указанием принципиального отличия человеческих репрезентаций: они не обязательно должны быть символьными и амодальными. Компьютерная метафора предполагает, что мы получаем информацию через нашу перцептивную систему в модально-специфическом виде (зрительном, слуховом, тактильном и т. д.), а затем перекодируем ее в абстрактный символьный амодальный формат, устроенный наподобие машинного кода. Один из основателей Укорененного познания, Лоуренс Барсалу, указывал на нехватку эмпирических свидетельств в пользу того, что подобное перекодирование вообще имеет место. Предложенный им альтернативный сценарий предполагает, что люди не перекодируют одни репрезентации в другие, а могут использовать модально-специфические репрезентации, привязанные как к перцептивному, так и к моторным системам, в процессе переработки информации любой глубины и сложности [4]. С точки зрения компьютерной метафоры, подобный ход является невозможным и даже бессмысленным, поскольку предполагает, что системы ввода и вывода (например, клавиатура, монитор и т. д.) функционально участвуют в работе центрального процессора. Однако более современная точка зрения пытается объединить эти две, казалось бы,

непримиримые позиции. Она состоит в том, что ментальные репрезентации связаны как с сенсомоторными процессами, так и с амодальными. Таким образом, подобные репрезентации являются гибридными, т. е. содержат как конкретные мультимодальные, так и абстрактные символичные компоненты. Подобная позиция опирается на следующие аргументы.

1. Классические теории амодальных репрезентаций предполагают довольно узкий взгляд на саму природу ментальной репрезентации. В исследованиях, опирающихся на такие теории, часто «знание чего-либо» — это всего лишь словесное «называние» [5], что явно не соответствует действительности.

2. Понятийные репрезентации как одна из разновидностей ментальных репрезентаций являются ограниченными конкретным контекстом [6; 7; 8], что совсем не соответствует амодальной точке зрения.

3. Гипотеза нейрональной вторичной переработки (Neuronal Recycling Hypothesis) [9] утверждает, что представление об укорененности абстрактных понятийных репрезентаций в перцептивных и моторных системах помогает четко ответить на вопрос, каким образом могли возникнуть и развиться за очень короткое, с точки зрения эволюции, время столь сложные высокоуровневые процессы, связанные с оперированием абстракциями (естественный язык, математика и т. д.).

Гибридные репрезентации несут разноплановые возможности для повышения эффективности процесса обучения, но также связаны и с существенными ограничениями. Мы постараемся продемонстрировать их на материале двух бурно развивающихся областей исследований — понимания символических выражений и графиков и диаграмм.

В обоих этих случаях мы можем обнаружить определенные переключки современных исследований с положениями культурно-исторической теории Л.С. Выготского. Нам представляется, что цитируемые работы можно интерпретировать как вполне убедительные конкретизации принципа опосредствования, т. е. использования разноплановых культурных средств для усиления структурно более простых и генетически более ранних психических функций [10]. Такой ход мысли помещает новомодные идеи в более удобный для отечественного психолога контекст.

Понимание символических выражений

Укорененность абстрактных ментальных репрезентаций в перцептивной системе проще всего продемонстрировать в области математики — области знания с максимально абстрактным содержанием. В качестве примера можно обратиться к тому, как люди читают и понимают символичные выражения вроде алгебраических уравнений. Алгебраическое уравнение может описывать огромный класс конкретных ситуаций, поэтому его абстрактность не вызывает сомнений. При этом смысл алгебраического уравнения, разумеется, не зависит от того, каким цветом или каким шрифтом оно напечатано. Тем не менее, перцептивная система вносит существенный

функциональный вклад в понимание этого класса символических выражений.

Алгебраическое уравнение содержит в себе абстрактные и иерархически упорядоченные отношения между переменными, однако форма записи уравнения тесно связана с перцептивными характеристиками, которые также могут входить в его репрезентацию и влиять на то, как оно будет пониматься. Например, пространственная близость между переменными может быть связана с порядком выполнения арифметических операций. В то время как порядок выполнения арифметических операций определяет их иерархию (высокоуровневые операции выполняют раньше низкоуровневых). В частности, операция сложения требует полного написания переменных и оператора ($p + q$), в то время как операция умножения допускает сокращенный вариант написания (pq). Кажется, что ничего из этого не говорит о включенности перцептивных элементов в ментальную репрезентацию уравнения, а скорее, о некоторых математических конвенциях. Однако это впечатление обманчиво.

На материале пространственной близости был проведен эксперимент, в рамках которого испытуемым требовалось оценить правильность предъявленных им уравнений. Оказалось, что они хуже справляются с поставленной задачей, если параметр пространственной близости между переменными был не связан с очередностью арифметических операций [11; 12]. Например, если между числами, которые нужно перемножить, меньше расстояние, чем между числами, которые нужно сложить, то это облегчает оценку правильности уравнения и затрудняет, если наоборот. Кроме того, было обнаружено, что если взрослых испытуемых, владеющих алгеброй, попросить написать уравнение от руки, то они будут писать переменные, связанные более высокой в плане их иерархии операций (например, умножения), ближе друг к другу, чем переменные, связанные операцией более низкого уровня (например, сложения) [13]. Исследователи предполагали, что символы и математические операторы автоматически активируют пространственные отношения. Что и оказалось на самом деле: расстояние слева и справа от знака «равно» до первого символа было максимальным [13].

Судя по имеющимся данным, влияние irrelevantной зрительно-пространственной информации только увеличивается с ростом экспертности [14]. В этом исследовании авторы с помощью онлайн-платформы собрали данные около 50 000 голландских школьников, которые должны были оценивать правильность уравнений. Было обнаружено, что у старшеклассников более выражена связь между пространственной близостью и порядком арифметических действий: близко расположенные переменные интерпретировались как первоочередные с точки зрения порядка действий. Данный эффект является парадоксальным, поскольку многие исследователи когнитивного развития на протяжении десятилетий предполагали, что развитие идет от конкретных форм мышления к более абстрактным и менее связанным с материалом. Однако процитированные результаты указывают на то, что с повышением экспертности

люди становятся более чувствительными к пространственной организации алгебраических выражений.

Одним из возможных объяснений является механизм перцептивного научения: перцептивная система может тренироваться, чтобы распределение внимания репрезентировало математическую задачу в соответствии с правилами решения. В качестве примера одного из исследований роли внимания в решении математических уравнений можно привести работу, где на материале алгебры была модифицирована парадигма верификации признаков [15]. Ранее было обнаружено, что проверка зрительных признаков (например цвета) происходит проще в рамках одной зрительной группировки, чем при сравнении нескольких [16]. В исследовании Маргетиса и коллег предъявлялись уравнения типа « $a * x + b * y$ » и менялся цвет двух соседних элементов с черного на синий или красный (рис. 1).

Испытуемым необходимо было сказать, одинаковый цвет у этих соседних переменных или разный. Элементы могли относиться к одному арифметическому действию (напомним, что умножение по правилам арифметики выполняется раньше сложения), а могли — к разным. Предполагалось, что иерархическая организация порядка действий в уравнении будет влиять на время ответа о том, какого цвета переменные. В частности, если переменные соединялись знаком умножения, время реакции для правильных ответов должно было быть меньше, чем для переменных, связанных сложением. Так и получилось, но только для испытуемых с высоким уровнем знаний в области алгебры. Эти результаты привели авторов к выводу о том, что перцептивная система играет функциональную роль в определении правильности действий по решению уравнений, а не просто является каналом получения информации. В другом исследовании с использованием метода регистрации движения глаз было обнаружено, что при определении правильности уравнения паттерны движений глаз соответствуют синтаксической структуре уравнения [17].

На основе полученных результатов была сформулирована гипотеза о пересборке перцептивно-моторных систем (Rigged Up Perception-Action Systems — RUPAS), призванная объяснить, за счет чего у людей получается

успешно оперировать сложными знаковыми системами без эволюционно сложившихся для этого когнитивных структур и механизмов [18]. Общая идея здесь состоит в том, что исходно оперирование знаковыми системами требует целого комплекса ресурсозатратных произвольно контролируемых процессов, но по мере научения происходит их автоматизация и замещение более экономными перцептивно-моторными шаблонами (routines).

Опираясь на эту гипотезу и полученные экспериментальные результаты, научная группа Роберта Голдстоуна разработала интерактивную систему обучения алгебре «Понятная математика» (Graspable Math), в рамках которой школьники в режиме реального времени могут активно манипулировать математическими операторами [19]. Подобный подход принципиально не связывает абстрактные уравнения с конкретным содержанием вроде монеток, спичек, яблок, пирогов и т. д. Предполагается, что подобная система позволяет понять важный тезис: сами переменные и операторы в каком-то смысле являются конкретными объектами, которыми можно манипулировать. Различные типы преобразований уравнения производятся путем физических действий по изменению пространственного расположения математических объектов. На данный момент уже получены свидетельства эффективности обучения алгебре с помощью этой системы [19; 20]. Но необходимо оценить эффективность предложенного подхода по сравнению с традиционным.

Понимание графиков и диаграмм

Еще одной областью применения идей Укорененного познания является визуализация данных. В естественнонаучных дисциплинах довольно часто приходится сталкиваться с наглядным представлением неочевидных абстрактных закономерностей. Поэтому, чтобы иметь возможность оптимизировать графики и диаграммы, сделать их максимально понятными, необходимо изучать, какие когнитивные процессы вовлечены в решение этой задачи.

Одним из направлений исследований в этой области является изучение перцептивных шаблонов (visual

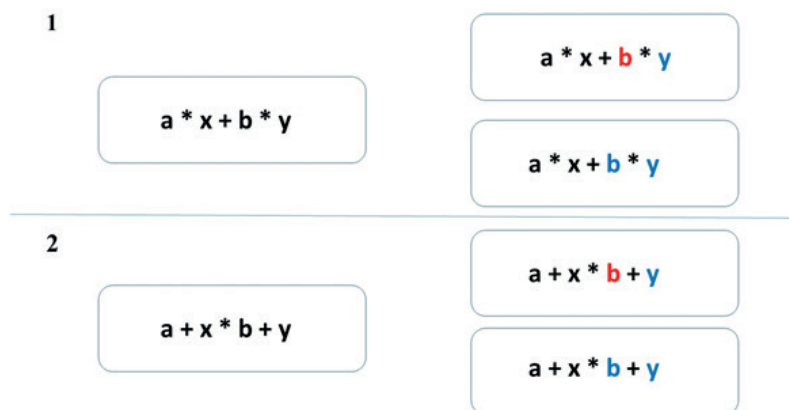


Рис. Пример стимулов для исследования верификации цвета на материале понимания символьных выражений [адаптировано по: 17]. (1) Верификация цвета в условии высокоуровневого оператора умножения. (2) Верификация цвета в условии низкоуровневого оператора сложения

routines) [21; 22], которые используются в процессе чтения графиков и которые могут влиять на конечную интерпретацию конкретного изображения. Сам факт того, что «зрительные шаблоны» влияют на интерпретацию графика, уже говорит о том, что подобные репрезентации укоренены в перцептивной системе. Авторы одной из работ использовали метод регистрации движения глаз, чтобы определить, что именно происходит в процессе понимания гистограмм [23]. Испытуемым необходимо было сравнить столбики гистограмм по цвету или по размеру. В результате было обнаружено, что при чтении этого типа графиков люди сначала выбирают своеобразную точку отсчета (в случае гистограмм — конкретный столбик на ней), с которым сравнивают остальные. Оказалось, что для гистограмм одинакового цвета, но различных по высоте, такой точкой отсчета чаще всего является наиболее высокий столбик. А если столбики отличаются по цвету, но одинаковы по размеру, то — наиболее темный. Однако, если столбики отличаются и по цвету, и по размеру, то испытуемые ориентируются на тот признак, который релевантен задаче (т. е. как именно стоит сравнивать столбики — по цвету или по размеру). Таким образом, перцептивные шаблоны оказываются задачей-специфичными, и если предъявляемые гистограммы допускают несколько вариантов понимания, то шаблоны вносят свой вклад в интерпретацию за счет определения исходной точки отсчета. Данный результат согласуется с другими, полученными в ходе оценки количества объектов на гистограммах, где итоговая интерпретация графика также зависела от выбранной точки отсчета [24].

Целая серия исследований была посвящена тому, как при чтении цветных графиков люди соотносят различные цвета и понятия, задающие семантику графика [25]. Получены свидетельства в пользу того, что гистограммы, отражающие разное количество объектов (фруктов), понимаются лучше, если цвет столбиков соответствует их цвету [26]. То есть перцептивные характеристики графика влияют на точность его интерпретации. Однако, как указывают авторы данного исследования, подобный эффект возникает только при условии сильной ассоциации между цветом и семантикой категории, отображаемой на графике.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что визуализация данных оказывается тем более эффективной, чем больше она следует принципу изоморфизма: перцептивные характеристики графиков так или иначе соответствуют (должны соответствовать) семантике отображаемых категорий.

Еще одно направление исследований укорененности ментальных репрезентаций в перцептивной системе в области визуализации связано с изучением роли порождения учениками схем, визуализирующих работу сложных систем. В целом, уже установлено, что если учащиеся самостоятельно порождают какие-то объяснения, примеры или аналогии к изучаемому материалу, то это повышает эффективность обучения [27; 28]. Но насколько важен визуальный формат этих объяснений и аналогий?

На данный момент уже есть свидетельства в пользу того, что объяснение учебного материала, сопровожда-

ющееся собственными схемами и диаграммами, более эффективно, чем без них [29]. В частности, было обнаружено, что если при чтении текста о тектонических плитах попросить студентов нарисовать диаграмму к тексту, то они справятся с последующим тестом сходного содержания лучше, чем студенты, которых просили написать краткое резюме прочитанного текста [30]. Схожие результаты были получены и для текста о законе сохранения энергии, понимание которого было лучше, если студентов просили нарисовать диаграмму, а не написать по этому поводу свой текст [31].

Одним из возможных объяснений преимуществ визуализаций перед вербальными описаниями является необходимость перевода из одного формата репрезентации в другой. Подобный перевод может способствовать нахождению пробелов и противоречий в исходных представлениях, а также последующему их развитию и уточнению [32]. В целом, перевод такого рода может помогать за счет более глубокой переработки информации. Однако возможно и другое объяснение, которое предполагает, что перцептивная и вербальная репрезентации соотносятся друг с другом и за счет подобной интеграции дают преимущество в обучении [33].

Тем не менее, есть свидетельства и против использования визуализаций в обучении. В частности, было обнаружено, что само рисование диаграмм для понимания текста по физике может привести к специфическим ошибкам понимания, когда неверное пространственное расположение компонентов диаграммы приводит к дополнительным трудностям в понимании усваиваемого материала [34]. Впрочем, автор указывает, что подобные ошибки встречаются только у новичков, не имеющих опыта использования диаграмм. Таким образом, преимущества визуализации в обучении опосредованы опытом использования диаграмм.

При этом ряд исследований позволяют утверждать, что здесь могут играть роль и пространственные способности как таковые. В частности, было обнаружено, что люди с низким уровнем таких способностей тратят больше ресурсов на построение зрительной репрезентации, а люди с высоким уровнем их развития охотно тратят эти ресурсы на соотнесение зрительных и вербальных репрезентаций [35]. Помимо этого, люди с низким уровнем пространственных способностей демонстрируют сложности в области анимации механических систем (не могут представить, как именно работает конкретное устройство, и ответить на соответствующие вопросы) [36]. Кроме того, было обнаружено, что люди с низким уровнем пространственных способностей склонны воспринимать визуализации как статичные картинки [37], в то время как люди с более высоким уровнем их развития встраивают визуализации в более сложные ментальные репрезентации и эффективно манипулируют ими.

Наконец, одно из наиболее известных исследований продемонстрировало, что если попросить испытуемых объяснить или нарисовать, как работает устройство (велосипедный насос), то информация о структурных компонентах насоса будет более точно усвоена и представлена в случае визуализации по сравнению с вербальным объяснением. В ответах о функциях и механике работы этого насоса различий обнаружено

не было [38]. Помимо этого, авторы указали, что, по результатам их исследования, визуализация все-таки помогает в научении и людям с низкими пространственными способностями, что в целом согласуется с уже накопленными эмпирическими свидетельствами в этой области. Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагать ученику нарисовать схему или диаграмму в процессе освоения абстрактного материала стоит, если у него достаточно низкие пространственные способности, а также если речь идет о структуре, а не о функциях изучаемого явления.

Подводя итоги, можно указать на потенциал использования гибридных репрезентаций, сочетающих в себе как перцептивные, так и абстрактные амодальные компоненты, в образовательном контексте. Само понятие гибридных репрезентаций может быть подсказкой для исследователей, стремящихся раскрыть механизмы, которые лежат в основе опосредствованности понятийного

мышления, а также точкой конвергенции современных когнитивных исследований и культурно-исторического подхода. В частности, вышеописанные исследования могут быть проинтерпретированы как иллюстрации того, как различные культурные средства в виде визуализаций (графиков или диаграмм) и в виде системы математических символов влияют на процессы научения.

С точки зрения практического приложения, результаты, свидетельствующие о перцептивной укорененности абстрактных репрезентаций, могут быть использованы в широком круге образовательных контекстов, начиная от создания специального программного обеспечения, которое сможет подсказывать нашей перцептивной системе оптимальные пути усвоения учебного материала, и заканчивая локальными рекомендациями по работе с визуализациями и вербальными описаниями сложных систем с целью сделать их более понятными для обучающихся.

Литература

1. Логинов Н.И., Спиридонов В.Ф. Воплощенное познание (embodied cognition): основные направления исследований // Вестник Санкт-Петербургского университета. Психология. 2017. Том 7. № 4. С. 343–364. DOI:10.21638/11701/spbu16.2017.404
2. Логинов Н.И., Спиридонов В.Ф. Воплощенное познание как современный тренд развития когнитивной психологии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 16. Психология. Педагогика. 2017. Том 7. № 1. С. 25–42. DOI:10.21638/11701/spbu16.2017.102
3. Мадни А.О., Спиридонов В.Ф. Радикальный подход к воплощенному познанию: теория динамических систем // Российский журнал когнитивной науки. 2018. Том 5. № 3. С. 37–55.
4. Barsalou L.W. Perceptions of perceptual symbols // Behavioral and brain sciences. 1999. Vol. 22. № 4. P. 637–660. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0140525X99532147>
5. Mahon B.Z., Caramazza A. Why does lexical selection have to be so hard? Comment on Abdel Rahman and Melinger's swinging lexical network proposal // Language and Cognitive Processes. 2009. Vol. 24. № 5. P. 735–748. DOI: <https://doi.org/10.1080/01690960802597276>
6. Machery E. Doing without concepts. Oxford: Oxford University Press, 2009. P. 283.
7. Connell L., Lynott D. Principles of representation: Why you can't represent the same concept twice // Topics in Cognitive Science. 2014. Vol. 6. № 3. P. 390–406. DOI: <https://doi.org/10.1111/tops.12097>
8. Yee E., Thompson-Schill S.L. Putting concepts into context // Psychonomic bulletin & review. 2016. Vol. 23. № 4. P. 1015–1027. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0948-7>
9. Dehaene S., Cohen L. Cultural recycling of cortical maps // Neuron. 2007. Vol. 56. № 2. P. 384–398. DOI: 10.1016/j.neuron.2007.10.004
10. Выготский Л.С. История развития высших психических функций // Л.С. Выготский. Собрание сочинений: в 6 т. Т. 3. М., 1983. С. 5–329.
11. Landy D., Goldstone R.L. Formal notations are diagrams: Evidence from a production task // Memory & cognition. 2007. Vol. 35. № 8. P. 2033–2040. DOI: <https://doi.org/10.3758/BF03192935>
12. Rivera J., Garrigan P. Persistent perceptual grouping effects in the evaluation of simple arithmetic expressions //

References

1. Loginov N.I., Spiridonov V.F. Voploshchennoe poznanie (embodied cognition): osnovnye napravleniya issledovaniy [Key areas of research in the embodied cognition approach]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Psikhologiya i pedagogika = Vestnik SPbSU. Psychology and Education, 2017. Vol. 7, no. 4, pp. 343–364. DOI:10.21638/11701/spbu16.2017.404 (In Russ.).
2. Loginov N.I., Spiridonov V.F. Voploshchennoe poznanie kak sovremenniy trend razvitiya kognitivnoi psikhologii [Embodied Cognition as a Current Trend in Cognitive Psychology]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Psikhologiya i pedagogika = Vestnik SPbSU. Psychology and Education, 2017. Vol. 7, no. 1, pp. 25–42. DOI:10.21638/11701/spbu16.2017.102 (In Russ.).
3. Madni A.O., Spiridonov V.F. Radikal'nyi podkhod k voploshchennomu poznaniyu: teoriya dinamicheskikh system [Radical approach to embodied cognition: dynamic system theory]. Rossiiskii zhurnal kognitivnoi nauki = The Russian Journal of Cognitive Science, 2018. Vol. 5, no. 3, pp. 37–55. (In Russ.).
4. Barsalou L. W. Perceptions of perceptual symbols. Behavioral and brain sciences, 1999. Vol. 22, no. 4, pp. 637–660. DOI: 10.1017/S0140525X99532147
5. Mahon B.Z., Caramazza A. Why does lexical selection have to be so hard? Comment on Abdel Rahman and Melinger's swinging lexical network proposal. Language and Cognitive Processes, 2009. Vol. 24, no. 5, pp. 735–748. DOI:10.1080/01690960802597276
6. Machery E. Doing without concepts. Oxford University Press, 2009. 283 p
7. Connell L., Lynott D. Principles of representation: Why you can't represent the same concept twice. Topics in Cognitive Science, 2014. Vol. 6, no. 3, pp. 390–406. DOI:10.1111/tops.12097
8. Yee E., Thompson-Schill S. L. Putting concepts into context. Psychonomic bulletin & review, 2016. Vol. 23, no. 4, pp. 1015–1027. DOI:10.3758/s13423-015-0948-7
9. Dehaene S., Cohen L. Cultural recycling of cortical maps. Neuron, 2007. Vol. 56, no. 2, pp. 384–398. DOI:10.1016/j.neuron.2007.10.004
10. Vygotskii L.S. Istoriya razvitiya vysshih psicheskikh funktsij [The History of the Development of Higher Mental Functions]. Sbornie sochinenij = Collected works. Moscow, 1983. Vol. 3, pp. 5–329 (In Russ.).

Memory & cognition. 2016. Vol. 44. № 5. P. 750–761. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0593-z>

13. Landy D., Goldstone R.L. How abstract is symbolic thought? // Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition. 2007. Vol. 33. № 4. P. 720. DOI: <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.4.720>

14. Braithwaite D.W. et al. Non-formal mechanisms in mathematical cognitive development: The case of arithmetic // Cognition. 2016. Vol. 149. P. 40–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.01.004>

15. Marghetis T., Landy D., Goldstone R.L. Mastering algebra retrains the visual system to perceive hierarchical structure in equations // Cognitive research: principles and implications. 2016. Vol. 1. № 1. P. 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0020-9>

16. Duncan J. Selective attention and the organization of visual information // Journal of experimental psychology: General. 1984. Vol. 113. № 4. P. 501. DOI: <https://doi.org/10.1037/0096-3445.113.4.501>

17. Schneider E. et al. Eye gaze reveals a fast, parallel extraction of the syntax of arithmetic formulas // Cognition. 2012. Vol. 125. № 3. P. 475–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.06.015>

18. Goldstone R.L. et al. Adapting perception, action, and technology for mathematical reasoning // Current Directions in Psychological Science. 2017. Vol. 26. № 5. P. 434–441. DOI: <https://doi.org/10.1177/0963721417704888>

19. Ottmar E. et al. Graspable mathematics: Using perceptual learning technology to discover algebraic notation // Integrating touch-enabled and mobile devices into contemporary mathematics education. IGI Global, 2015. P. 24–48.

20. Ottmar E., Landy D. Concreteness fading of algebraic instruction: Effects on learning // Journal of the Learning Sciences. 2017. Vol. 26. № 1. P. 51–78. DOI: <https://doi.org/10.1080/10508406.2016.1250212>

21. Cavanagh P. Attention routines and the architecture of selection // Cognitive Neuroscience of Attention. New York: Guilford Press, 2004. P. 13–28.

22. Ullman S. Visual routines // Cognition. 1984. Vol. 18. P. 97–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50035-0>

23. Michal A.L., Franconeri S.L. Visual routines are associated with specific graph interpretations // Cognitive research: principles and implications. 2017. Vol. 2. № 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0059-2>

24. Michal A.L. et al. Visual routines for extracting magnitude relations // Psychonomic bulletin & review. 2016. Vol. 23. № 6. P. 1802–1809. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1047-0>

25. Schloss K.B. et al. Color inference in visual communication: the meaning of colors in recycling // Cognitive research: principles and implications. 2018. Vol. 3. № 1. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0090-y>

26. Lin S. et al. Selecting semantically-resonant colors for data visualization // Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2013. Vol. 32. № 3/4. P. 401–410. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.12127>

27. Chi M.T.H. Active-constructive-interactive: A conceptual framework for differentiating learning activities // Topics in cognitive science. 2009. Vol. 1. № 1. P. 73–105. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01005.x>

28. Hall V. C., Bailey J., Tillman C. Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? // Journal of Educational Psychology. 1997. Vol. 89. № 4. P. 677–681. DOI: <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.677>

29. Ainsworth S., Loizou Th.A. The effects of self-explaining when learning with text or diagrams // Cognitive science. 2003. Vol. 27. № 4. P. 669–681. DOI: https://doi.org/10.1207/s15516709cog2704_5

11. Landy D., Goldstone R. L. Formal notations are diagrams: Evidence from a production task. *Memory & cognition*, 2007. Vol. 35, no. 8, pp. 2033–2040. DOI:10.3758/BF03192935

12. Rivera J., Garrigan P. Persistent perceptual grouping effects in the evaluation of simple arithmetic expressions. *Memory & cognition*, 2016. Vol. 44, no. 5, pp. 750–761. DOI:10.3758/s13421-016-0593-z

13. Landy D., Goldstone R. L. How abstract is symbolic thought? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2007. Vol. 33, no. 4, pp. 720. DOI:10.1037/0278-7393.33.4.720

14. Braithwaite D. W. et al. Non-formal mechanisms in mathematical cognitive development: The case of arithmetic. *Cognition*, 2016. Vol. 149, pp. 40–55. DOI:10.1016/j.cognition.2016.01.004

15. Marghetis T., Landy D., Goldstone R. L. Mastering algebra retrains the visual system to perceive hierarchical structure in equations. *Cognitive research: principles and implications*, 2016. Vol. 1, no. 1, pp. 25. DOI:10.1186/s41235-016-0020-9

16. Duncan J. Selective attention and the organization of visual information. *Journal of experimental psychology: General*, 1984. Vol. 113, no. 4, pp. 501. DOI:10.1037/0096-3445.113.4.501

17. Schneider E. et al. Eye gaze reveals a fast, parallel extraction of the syntax of arithmetic formulas. *Cognition*, 2012. Vol. 125, no. 3, pp. 475–490. DOI:10.1016/j.cognition.2012.06.015

18. Goldstone R. L. et al. Adapting perception, action, and technology for mathematical reasoning. *Current Directions in Psychological Science*, 2017. Vol. 26, no. 5, pp. 434–441. DOI:10.1177/0963721417704888

19. Ottmar E. et al. Graspable mathematics: Using perceptual learning technology to discover algebraic notation. Integrating touch-enabled and mobile devices into contemporary mathematics education. IGI Global, 2015, pp. 24–48.

20. Ottmar E., Landy D. Concreteness fading of algebraic instruction: Effects on learning. *Journal of the Learning Sciences*, 2017. Vol. 26, no. 1, pp. 51–78. DOI:10.1080/10508406.2016.1250212

21. Cavanagh P. Attention routines and the architecture of selection. Cognitive Neuroscience of Attention. New York: Guilford Press, 2004, pp. 13–28.

22. Ullman, S. Visual routines. *Cognition*, 1984. Vol. 18, pp. 97–159. DOI:10.1016/B978-0-08-051581-6.50035-0

23. Michal A.L., Franconeri S. L. Visual routines are associated with specific graph interpretations. *Cognitive research: principles and implications*, 2017. Vol. 2, no. 1, pp. 1–10. DOI:10.1186/s41235-017-0059-2

24. Michal A.L. et al. Visual routines for extracting magnitude relations. *Psychonomic bulletin & review*, 2016. Vol. 23, no. 6, pp. 1802–1809. DOI:10.3758/s13423-016-1047-0

25. Schloss K.B. et al. Color inference in visual communication: the meaning of colors in recycling. *Cognitive research: principles and implications*, 2018. Vol. 3, no. 1, pp. 1–17. DOI:10.1186/s41235-018-0090-y

26. Lin S. et al. Selecting semantically resonant colors for data visualization. Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2013. Vol. 32, no. 3/4, pp 401–410. DOI:10.1111/cgf.12127

27. Chi M.T.H. Active-constructive-interactive: A conceptual framework for differentiating learning activities. *Topics in cognitive science*, 2009. Vol. 1, no. 1, pp. 73–105. DOI:10.1111/j.1756-8765.2008.01005.x

28. Hall V. C., Bailey J., Tillman C. Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 1997. Vol. 89, no. 4, pp. 677. DOI:10.1037/0022-0663.89.4.677

29. Ainsworth S., Loizou Th. A. The effects of self-explaining when learning with text or diagrams. *Cognitive science*, 2003. Vol. 27, no. 4, pp. 669–681. DOI:10.1207/s15516709cog2704_5

30. Gobert J.D., Clement J.J. Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics // *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 1999. Vol. 36. № 1. P. 39–53. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199901\)36:1<39::AID-TEA4>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<39::AID-TEA4>3.0.CO;2-I)
31. Edens K.M., Potter E. Using descriptive drawings as a conceptual change strategy in elementary science // *School science and mathematics*, 2003. Vol. 103. № 3. P. 135–144. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2003.tb18230.x>
32. Ainsworth S., Bibby P., Wood D. Examining the effects of different multiple representational systems in learning primary mathematics // *The Journal of the Learning Sciences*, 2002. Vol. 11. № 1. P. 25–61. DOI: https://doi.org/10.1207/S15327809JLS1101_2
33. Aleven V.A., Koedinger K.R. An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor // *Cognitive science*, 2002. Vol. 26. № 2. P. 147–179. DOI: https://doi.org/10.1207/s15516709cog2602_1
34. Wilkin B. Learning from explanations: Diagrams can “inhibit” the self-explanation effect // *Reasoning with diagrammatic representations II*, 1997. P. 136–143.
35. Mayer R.E., Sims V.K. For whom is a picture worth a thousand words? Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning // *Journal of educational psychology*, 1994. Vol. 86. № 3. P. 389. DOI: <https://doi.org/10.1037/0022-0663.86.3.389>
36. Hegarty M., Just M.A. Constructing mental models of machines from text and diagrams // *Journal of memory and language*, 1993. Vol. 32. № 6. P. 717–742. DOI: <https://doi.org/10.1006/jmla.1993.1036>
37. Kozhevnikov M., Hegarty M., Mayer R. E. Revising the visualizer-verbalizer dimension: Evidence for two types of visualizers // *Cognition and instruction*, 2002. Vol. 20. № 1. P. 47–77. DOI: https://doi.org/10.1207/S1532690XCI2001_3
38. Bobek E., Tversky B. Creating visual explanations improves learning // *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2016. Vol. 1. № 1. P. 27. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0031-6>
30. Gobert J. D., Clement J. J. Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 1999. Vol. 36, no. 1, pp. 39–53. DOI:10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<39::AID-TEA4>3.0.CO;2-I
31. Edens K. M., Potter E. Using descriptive drawings as a conceptual change strategy in elementary science. *School science and mathematics*, 2003. Vol. 103, no. 3, pp. 135–144. DOI:10.1111/j.1949-8594.2003.tb18230.x
32. Ainsworth S., Bibby P., Wood D. Examining the effects of different multiple representational systems in learning primary mathematics. *The Journal of the Learning Sciences*, 2002. Vol. 11, no. 1, pp. 25–61. DOI:10.1207/S15327809JLS1101_2
33. Aleven V. A., Koedinger K. R. An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor. *Cognitive science*, 2002. Vol. 26, no. 2, pp. 147–179. DOI:10.1207/s15516709cog2602_1
34. Wilkin B. Learning from explanations: Diagrams can “inhibit” the self-explanation effect. *Reasoning with diagrammatic representations II: Papers from AAAI Fall Symposium*, 1997, pp. 136–143.
35. Mayer R. E., Sims V. K. For whom is a picture worth a thousand words? Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning. *Journal of educational psychology*, 1994. Vol. 86, no. 3, pp. 389. DOI:10.1037/0022-0663.86.3.389
36. Hegarty M., Just M. A. Constructing mental models of machines from text and diagrams. *Journal of memory and language*, 1993. Vol. 32, no. 6, pp. 717–742. DOI:10.1006/jmla.1993.1036
37. Kozhevnikov M., Hegarty M., Mayer R. E. Revising the visualizer-verbalizer dimension: Evidence for two types of visualizers. *Cognition and instruction*, 2002. Vol. 20, no. 1, pp. 47–77. DOI:10.1207/S1532690XCI2001_3
38. Bobek E., Tversky B. Creating visual explanations improves learning. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2016. Vol. 1, no. 1, pp. 27. DOI:10.1186/s41235-016-0031-6

Информация об авторах

Логинов Никита Иванович, кандидат психологических наук, доцент кафедры общей психологии факультета психологии, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5994-4191>, e-mail: lognikita@yandex.ru

Мадни Анна Олеговна, младший научный сотрудник лаборатории когнитивных исследований факультета психологии, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-9980>, e-mail: jaf@life.ru

Спиридонов Владимир Феликсович, доктор психологических наук, профессор, декан Факультета психологии, заведующий лабораторией когнитивных исследований факультета психологии, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (ФГБОУ ВО «РАНХиГС»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>, e-mail: vfspiridonov@yandex.ru

Information about the authors

Nikita I. Loginov, PhD in Psychology, Associate Professor, Chair of General Psychology, Psychological Department, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5994-4191>, e-mail: lognikita@yandex.ru

Anna O. Madni, Junior researcher, Laboratory of Cognitive Research, Psychological Department, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-9980>, e-mail: jaf@life.ru

Vladimir F. Spiridonov, PhD in Psychology, Professor, Dean of Psychological Department, Head of Laboratory of Cognitive Research, Psychological Department, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>, e-mail: vfspiridonov@yandex.ru

Получена 25.08.2020

Принята в печать 27.04.2022

Received 25.08.2020

Accepted 27.04.2022