

Гассий Марта Валерьевна

магистрант

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

г. Краснодар, Краснодарский край

DOI 10.31483/r-168009

КОГНИТИВНЫЕ И НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОСВОЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ: ОТ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДО ТЕОРИИ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ

***Аннотация:** в статье представлен междисциплинарный анализ когнитивных и нейрофизиологических механизмов, лежащих в основе освоения фундаментальных физических теорий. Проблематика исследования связана с необходимостью интеграции данных нейровизуализации и когнитивной психологии для разработки эффективных методик преподавания физики, учитывающих естественные ограничения человеческого мозга. Методологическую основу составил критический обзор зарубежных фМРТ-исследований, а также анализ теорий когнитивной нагрузки, «магического числа семь» и ментальных моделей. Результаты: выявлены ключевые мозговые структуры, обеспечивающие абстрактное и пространственное мышление при решении физических задач. Показано, что различные физические концепции кодируются различными паттернами нейронной активности, а успешное обучение требует подавления интуитивных стратегий и построения персонализированных ментальных моделей. Обоснована необходимость учёта когнитивных ограничений при разработке нейроориентированных методик преподавания физики. Статья адресована исследователям в области нейрофизиологии обучения, педагогам и психологам.*

***Ключевые слова:** нейрофизиология, фМРТ, абстрактное мышление, пространственное мышление, когнитивная нагрузка, рабочая память, ментальные модели, нейроориентированные методики преподавания физики.*

Нейрофизиологические корреляты абстрактного и пространственного мышления при решении физических задач.

Современные методы нейровизуализации, в частности функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), позволяют исследовать мозговые механизмы, лежащие в основе сложных когнитивных процессов, таких как решение физических задач. Нейрофизика как междисциплинарная область объединяет физические методы измерения и анализа нервной активности с задачами когнитивной психологии и педагогики [1].

В контексте обучения физике ключевым становится вопрос: какие нейронные сети обеспечивают абстрактное оперирование физическими понятиями и пространственное моделирование физических ситуаций? Ответ на этот вопрос позволяет не только понять природу физического мышления, но и разработать нейроориентированные методики преподавания. С той целью рассмотрим результаты эмпирических фМРТ-исследований, выявляющих нейрофизиологические корреляты абстрактного и пространственного мышления при решении задач по механике, электродинамике и другим разделам физики.

ФМРТ-исследования решения физических задач. Одним из первых систематических исследований нейронных основ физического мышления стали работы Кевина Данбара и его коллег [6–8]. В экспериментах участникам предлагалось просматривать видеоролики с движущимися объектами (шарами, блоками) и интерпретировать их либо в рамках наивной физики (например, как обычные бильярдные шары), либо в рамках научной физики (как взаимодействие заряженных частиц или тела, подчиняющиеся законам Ньютона).

Результаты показали, что при наивной интерпретации активируются области правой теменной доли, связанные с перцептивной обработкой движения. При научной интерпретации тех же самых видеороликов активация переключалась на височные доли, участвующие в семантической обработке, и на префронтальную кору, ответственную за категоризацию и аналогический перенос [6]. Данбар также обнаружил, что у экспертов-физиков при решении задач, требующих применения формальных законов, возникает дополнительная активация в передней поясной коре и дорсолатеральной префронтальной коре, что интерпретируется

как механизм подавления интуитивных, но неверных перцептивных стратегий [7].

Значительный прогресс в понимании нейронных репрезентаций физических концепций достигнут в работах Роберта Мейсона и Марсела Джаста (Carnegie Mellon University). В исследовании 2016 года [17] участники (студенты инженерных специальностей) выполняли задания на мысленное сравнение физических величин (масса, импульс, энергия, центростремительная сила, частота и др.).

Используя метод мультивоксельного анализа паттернов (MVPA), авторы показали, что различные физические концепции кодируются различными паттернами активации в теменной, височной и префронтальной коре. Более того, была выявлена общая факторная структура, описывающая организацию физических знаний в мозге: каузальная визуализация движения, периодичность, алгебраическая форма и поток энергии. Точность декодирования конкретной концепции по фМРТ-паттернам достигла 75% [17].

В последующих работах [19; 20] Мейсон и Джаст показали, что относительно новые для эволюции человека физические понятия (например, «частота» или «электрическое поле») «укореняются» в филогенетически древних системах мозга: так, репрезентация частоты использует те же нейронные сети, что и обработка нарастания и спада звука. В 2018 году эта исследовательская группа получила грант NSF на лонгитюдное изучение того, как нейронные репрезентации физических концепций изменяются у студентов в течение одного семестра обучения физике [5].

Исследование, выполненное под руководством Эрика Бреве (Drexel University) [3; 4], стало одним из первых, где фМРТ использовалось для оценки изменений в мозге студентов до и после прохождения курса физики, построенного на методике моделирования (Modeling Instruction).

При решении физических задач до обучения у студентов наблюдалась активация в дорсолатеральной префронтальной коре и теменной коре – областях, образующих центральную исполнительную сеть, связанную с вниманием и рабочей

памятью. После семестра активного обучения дополнительно, кроме этих областей, наблюдались активация в фронтальных полюсах, которые связаны с интеграцией информации, а также в задней части поясной коры, которая участвует в эпизодической памяти и самореферентном мышлении [4].

Анализируя и интерпретируя результаты проведенных исследований, авторы пришли к выводу, что глубокое понимание физики требует построения персонализированных ментальных моделей, возможно, при необходимости, включающих элементы личного опыта. Простое алгоритмическое применение формул не формирует должным образом понятийный аппарат.

Особый интерес вызывает ряд работ, посвящённых нейронным основам интуитивной физики. Под интуитивной физикой понимается способность быстро оценивать динамику объектов, например, по какой траектории будет двигаться мяч или насколько устойчива та или иная конструкция. Джейсон Фишер и Нэнси Канвишер в своем исследовании в 2016 в Массачусетском технологическом институте идентифицировали с помощью фМРТ кортикальные области, такие как верхняя теменная доля, внутритеменная борозда, а также премоторная кора. Они селективно активировались при решении задач на интуитивную физику [10]. Авторы предположили, что эти области реализуют своего рода «движок интуитивной физики» (physics engine), который моделирует поведение объектов на основе неявных знаний о законах механики.

Хотя основные работы Роланда Грабнера касаются математического мышления, его выводы о роли теменной коры и фронтальных областей при решении арифметических и алгебраических задач непосредственно релевантны для физики [12; 13]. Грабнер и соавторы показали, что левая угловая извилина (left angular gyrus) критически вовлечена в извлечение фактов из долговременной памяти – процесса, необходимого при применении физических формул. Кроме того, в совместных исследованиях с Андреасом Финком было установлено, что творческое решение задач, в отличие от алгоритмического, активирует дополнительные области правого полушария, включая переднюю верхнюю височную извилину [9].

Нейрофизиологические корреляты абстрактного мышления в физике. Под абстрактным мышлением в физике понимается способность оперировать понятиями, которые не имеют непосредственного перцептивного эквивалента (потенциал, поле, энергия, энтропия), а также способность выводить следствия из общих законов и применять их в конкретных ситуациях. Нейрофизиологические исследования выявляют несколько ключевых структур, обеспечивающих эту способность.

Первая и наиболее часто активируемая область – дорсолатеральная префронтальная кора (DLPFC). Она участвует в рабочей памяти, планировании, аналогическом переносе и категоризации. В работах Данбара [6, 7] показано, что DLPFC активируется, когда студент должен распознать, что некоторая ситуация (например, движение магнита) подпадает под действие закона сохранения энергии, даже если внешне она не похожа на стандартные примеры из учебника. Подавление интуитивных, но ошибочных ответов также связано с активностью DLPFC и передней поясной коры [11].

Вторая ключевая область – теменная кора, особенно внутритеменная борозда (IPS) и угловая извилина. В исследовании Мейсона и Джаста [17] паттерны активации в IPS различались для концепций «масса» и «сила», что говорит о дискретной нейронной репрезентации даже близких абстрактных величин. Угловая извилина левого полушария, как показано в мета-анализах [26], специфически связана с оперированием символическими представлениями (формулами, обозначениями). При решении задач по электродинамике (например, применение закона Кулона) именно угловая извилина демонстрирует устойчивую активацию [25].

Третья структура – передняя поясная кора (ACC), которая отвечает за мониторинг конфликтов и обнаружение ошибок. Она проявляет повышенную активность при решении физических задач, где интуитивный и научный ответы не коррелируют между собой, а иногда даже противоречат друг другу. В качестве простейшего примера можно привести задачу о падении тяжёлого и лёгкого шаров.

Особенно активна АСС у обучающихся, способных успешно преодолеть интуицию и дать обоснованный с научной точки зрения ответ [11, 8].

Хамрик исследовал оценку массы объекта в разных контекстах: сжатие пружины, столкновение шаров, удержание блока на наклонной плоскости. В результате фМРТ анализ зафиксировал активацию одного и того же паттерна в теменной и префронтальной коре из чего следует вывод, что мозг оперирует абстрактной переменной «масса», а не просто визуальными или кинестетическими признаками. Исходя из этого важно подчеркнуть, что абстрактные физические переменные кодируются в мозге инвариантным образом и не зависят от конкретной визуальной сцены [14].

Нейрофизиологические корреляты пространственного мышления при решении физических задач. Пространственное мышление традиционно считается одним из предикторов успешности в физике и инженерных дисциплинах [28]. Оно включает мысленное вращение объектов, пространственную визуализацию траекторий, представление силовых линий и сечений трёхмерных тел. Нейрофизиологические исследования однозначно связывают пространственное мышление с активацией дорсального зрительного пути, особенно с верхней теменной долькой (SPL) и внутритеменной бороздой (IPS).

В экспериментах Фишера и Канвишер [10] при решении задач на устойчивость башен из блоков (что требует мысленного моделирования сил и моментов) наблюдалась устойчивая активация в SPL билатерально. Авторы также отметили вовлечение премоторной коры, что указывает на связь между пространственным воображением и моторными программами действия – своего рода «мысленная симуляция» физического взаимодействия.

В контексте решения задач по механике, например, при определении траектории тела, брошенного под углом к горизонту, фМРТ-исследования [16] показывают активацию SPL, а также теменно-затылочной борозды. Интересно, что у студентов с высокими пространственными способностями активация в этих областях более фокусирована и менее интенсивна, что интерпретируется как более эффективное использование нейронных ресурсов [22].

С активацией теменных областей также связано пространственное мышление в электродинамике, например, при мысленном представлении силовых линий электрического поля или магнитных линий. В ходе проведения некоторого эксперимента участникам показывали изображения электрических диполей и просили определить направление силы. Активация в IPS и SPL была сопоставима с таковой при классических заданиях на мысленное вращение [25].

В пространственной обработке символической информации задействована левая теменная доля. Исследования, рассматривающие её роль при решении соответствующих задач, заслуживают особого внимания. При чтении графиков в кинематике, термодинамике и электродинамике или интерпретации векторных диаграмм фиксировалась активация угловой извилины, которая связывает визуально-пространственную информацию с семантическими категориями [24]. С точки зрения нейрофизиологии это обосновывает необходимость и подчеркивает важность обучения чтению и построению графиков в курсе физики.

Исходя из проведённого анализа фМРТ-исследований, можно выделить несколько основных нейрофизиологических коррелятов абстрактного и пространственного мышления, активирующихся при решении различных физических задач.

1. Дорсолатеральная префронтальная кора (DLPFC), которая отвечает за обеспечение категоризацию, аналогический перенос, рабочую память и подавление интуитивных стратегий.

2. Передняя поясная кора (ACC), участвующая в мониторинге конфликта между интуитивным и научным ответами.

3. Внутритеменная борозда (IPS) и верхняя теменная доля (SPL) осуществляют кодирование абстрактных физических переменных – физических величин, не имеющих прямой ассоциации с материальным миром. Кроме того, IPS и SPL участвуют в пространственном моделировании траекторий движения тел, представлении полей и линий действия сил.

4. Угловая извилина левого полушария (AG) отвечает за связь символических записей в виде буквенных обозначений или формул с пространственными и семантическими репрезентациями.

5. Премоторная кора задействована в реализации мысленной симуляции физических взаимодействий.

Физика как наука требует координации нескольких когнитивных сетей: исполнительной (префронтальной), пространственной (теменной) и семантической (височной) и процесс ее изучения нельзя свести к простому запоминанию формул. Анализ различных зарубежных исследований по данной теме это подтверждает. Выявленные нейрофизиологические закономерности являются основой для разработки диагностического инструментария для проведения нейрофизиологического исследования и в дальнейшем соответствующей методики преподавания физики.

Особенности освоения фундаментальных физических теорий как когнитивный процесс.

Общий ход учебного процесса так или иначе создает умственную нагрузку на обучающихся. В результате этого снижается их способность обрабатывать и запоминать новую информацию. На качество усвоения новых знаний, на способность применять их на практике и на то, насколько просто это даётся обучающимся влияет когнитивная нагрузка.

Джон Свеллер – специалист по психологии разработал теорию когнитивной нагрузки [27] (Cognitive load theory). Суть теории, объединяющей в себе образовательную и психологическую сферы, заключается в утверждении, что для достижения качественного и оптимального усвоения изучаемого материала обучающимися необходимо рассчитать и грамотно распределить нагрузку на их оперативную память.

Рассматриваемая теория базируется на положениях когнитивной психологии. Ключевая роль в ней отводится схемам и памяти, которая подразделяется на оперативную (рабочую) и долговременную. Любое получаемое нами знание,

первоначально проходит через локусы мозга, отвечающие за оперативную память [2].

Рабочая память обрабатывает и удерживает информацию, которая поступает извне. В процессе временного хранения оперативная память систематизирует, организует, сравнивает и сопоставляет данные. Именно поэтому её пропускная способность ограничена.

Применительно к процессу преподавания нужно учитывать, что обучающийся в состоянии качественно усвоить и запомнить лишь определённый объём сведений, который некоторым образом ограничен. Когда во время занятия мозгу даётся слишком много информации, в результате чего он оказывается перегружен, результативность и продуктивность такого обучения стремительно снижается, а при работе с «трудными» детьми может и вовсе отсутствовать. Чем больше информационно ценного материала вводится в процессе урока, тем менее качественно он понимается, усваивается и запоминается, а, следовательно, в дальнейшем хуже воспроизводится и применяется на практике. Эту закономерность описывает понятие «кошелёк Миллера» или, как его еще называют, правило «магического числа семь».

Американский исследователь и психолог Джордж Миллер проводил ряд экспериментов по изучению параметров памяти. В роли испытуемых выступали люди, работающие операторами. Результаты опытов показали, что кратковременная память в среднем удерживает пять простых односложных слов, семь букв, восемь десятичных цифр и девять двоичных знаков. Таким образом он вывел свой принцип, определяющий, что человек одновременно способен удержать в памяти и повторить не больше, чем 7 ± 2 различных элементов [21].

Простыми словами, кратковременная память похожа на кошелёк, куда одновременно можно положить в среднем семь монеток и совершенно неважно, какие именно монетки лежат в кошельке, главное, чтобы их было семь. То есть память не фиксирует смысл информации и не анализирует его, для нее важны лишь

внешние количественные характеристики. Если элементов больше семи или максимум – девяти, мозг сам группирует их так, чтобы в итоге получилось от пяти до девяти запоминаемых единиц.

Уже усвоенная информация, сформированная в виде знаний, хранится в долговременной памяти. Предполагается, что в ходе дальнейшего изучения дисциплины они могут и должны служить опорой и фундаментом для формирования уже новых понятий в процессе обучения. Рабочая память ограничена и в случае, если в долговременной памяти нет нужных сведений и отсутствует необходимая база становится непосильно трудное решение каких-либо сложных задач. Таким образом, становится очевидной необходимость своевременной проверки и учета уровня сформированности знаний (их наличия или отсутствия) в долговременной памяти в процессе обучения. В противном случае новая информация просто не будет усваиваться [2].

Согласно теории когнитивной нагрузки, память содержит определённые схемы, формирующие и образующие базу знаний человека. Опираясь и ориентируясь на эти когнитивные структуры, мозг может решать задачи, воспринимать и усваивать новую информацию. В этих условиях задача педагога заключается в подборе и адаптации материала таким образом, чтобы у обучающихся первоначально эти схемы вырабатывались, а затем постепенно усложнялись. В точных науках этот принцип очевиден и особенно важен.

Рассмотрим на примере математики: сначала дети учатся складывать и вычитать, после этого они осваивают умножение, затем – деление и так далее. Они запоминают небольшой количественно ограниченный объём информации, который постепенно накапливается и переходит в долгосрочную память. Таким образом, когда возникает необходимость понять новые математические действия и операции, мозг уже способен применять для решения задач более сложные схемы. Необходимо отметить, что применение этого подхода также достаточно результативно и в гуманитарных дисциплинах. Например, при разделении материала, разбивая информацию на короткие, логически завершённые части.

Применительно к преподаванию физики ограничения оперативной памяти приобретают особое значение. Физика оперирует абстрактными понятиями, которые невозможно непосредственно наблюдать: сила, энергия, поле, потенциал и множество других физических величин являются ментальными конструктами, требующими особых когнитивных усилий для усвоения.

Специфику теории когнитивной нагрузки в физике можно связать с несколькими различными факторами. Во-первых, оперирование абстрактными символами и формулами. При работе с физическими формулами обучающийся должен удерживать в рабочей памяти одновременно все входящие в них символы, каждый из которых обозначает определённую физическую величину, а самое главное понимать функциональные связи между переменными. В качестве примера проанализируем запись второго закона Ньютона $F=ma$. Необходимо осознавать, что F – это результирующая сила (векторная сумма всех сил, действующих на тело), m – масса (мера инертности), a – ускорение. В случае если обучающийся не автоматизировал эти базовые соотношения до уровня, позволяющего извлекать их из долговременной памяти без дополнительных когнитивных затрат, рабочая память оказывается перегруженной.

Во-вторых, необходимость одновременного удержания множества репрезентаций. Репрезентация отвечает за представление в сознании человека образов объекта. Решая физическую задачу учащемуся практически всегда необходимо параллельно работать с разными формами репрезентации такими как: словесное описание условия, схематический рисунок, график, математическая формула и числовой расчёт. Каждый переход между форматами создаёт дополнительную нагрузку на рабочую память, и, если объём одновременно обрабатываемой информации превышает 7 ± 2 элемента (или, по современным данным, 3–5 элементов), эффективность обработки информации снижается.

В-третьих, автоматизация фундаментальных соотношений. Как показывают исследования, для успешного решения задач по физике обучающиеся должны довести фундаментальные соотношения (например, законы Ньютона, уравнения Максвелла, термодинамические соотношения) до уровня автоматизма. Без этого

рабочая память расходуется на припоминание базовых фактов, а не на анализ конкретной проблемной ситуации.

Указанные ограничения имеют прямое педагогическое следствие: при объяснении нового физического материала необходимо разбивать информацию на небольшие когнитивные блоки, давая обучающимся возможность постепенно наращивать сложность ментальных схем без перегрузки оперативной памяти.

Тесно связанным с теорией когнитивной нагрузки является понятие ментальной модели, разработанное в когнитивной психологии Филипом Николасом Джонсон-Лэрдом [15] в 1983 году. Согласно этой теории, понимание – это способность строить ментальную репрезентацию (модель), которая изоморфна структуре описываемого фрагмента реальности.

В контексте обучения физике категория ментальной модели приобретает ключевое значение. Исследователи различают три типа моделей, используемых в физике: физические (материальные объекты, экспериментальные установки), математические (уравнения, формулы, графики) и ментальные (внутренние когнитивные репрезентации, которые строит обучающийся).

Процесс построения адекватной ментальной модели физического явления – это центральное звено в освоении фундаментальных физических теорий. Ментальные модели выполняют следующие функции:

- объяснительная функция: модель позволяет объяснить, почему физическая система ведёт себя тем или иным образом;
- прогностическая функция: на основе модели можно предсказать поведение системы в новых условиях;
- эвристическая функция: модель служит инструментом для поиска решения нестандартных задач.

Особый интерес для педагогики представляет диагностическая функция анализа ментальных моделей. Дж. Гэффни в 2010 году показал, что ошибки обучающихся при решении концептуальных физических задач часто возникают из-за того, что их ментальная модель не охватывает все возможные состояния си-

стемы – обучающийся «не достраивает» пространство возможностей, что приводит к неполным или ошибочным выводам. Например, при анализе движения тела под действием нескольких сил обучающийся может учитывать не все векторные составляющие, что приводит к неверному определению равнодействующей. Задача педагога заключается не столько в передаче готовых формул, сколько в содействии построению правильных ментальных моделей, которые затем могут служить когнитивной основой для применения более сложных схем рассуждения.

И.М. Грека и М.А. Морейра в 2002 году в своём исследовании интерпретировали данные об обучении физике студентов колледжа именно в рамках теории ментальных моделей Джонсон-Лэрда. Они пришли к выводу, что эффективное обучение физике должно быть направлено не только на передачу математических формулировок законов, но и на целенаправленное формирование у обучающихся адекватных ментальных моделей изучаемых явлений. Эти модели затем могут служить основой для построения более сложных когнитивных схем и эффективного решения задач в новых контекстах.

В конечном итоге теория когнитивной нагрузки [23] объясняет количественные ограничения переработки информации, в то время как понятие ментальной модели раскрывает качественную структуру того, как эта информация организуется в сознании обучающегося при освоении физических теорий. Таким образом они тесно взаимосвязаны между собой и органично дополняют друг друга.

Список литературы

1. Кондратьев И.В. Нейрофизика: физические методы в исследовании мозга / И.В. Кондратьев, А.Я. Каплан. – М.: Физматлит, 2020. – 312 с.
2. Теория когнитивной нагрузки: ограничения человеческой памяти, влияющие на учебный процесс. – URL: <https://lala.lanbook.com/teoriya-kognitivnoj-nagruzki> (дата обращения: 04.02.2025).
3. Brain activity links performance in science reasoning with conceptual approach / J.E. Bartley, M.C. Riedel, T. Salo [et al.] // npj Science of Learning. – 2019. – Vol. 4. – P. 20. – DOI: 10.1038/s41539-019-0059-8.

4. Toward a neurobiological basis for understanding learning in university modeling instruction physics courses / E. Brewster, J.E. Bartley, M.C. Riedel [et al.] // *Frontiers in ICT*. – 2018. – Vol. 5. – P. 10. – DOI: 10.3389/fict.2018.00010.
5. Carnegie Mellon University. NSF grant #1841884: Neural representations of physics concepts. – URL: https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1841884 (дата обращения: 07.07.2026).
6. Dunbar K.N. The Biology of Physics: What the Brain Reveals about Our Understanding of the Physical World / K.N. Dunbar // *Physics Education Research Conference*. – 2009. – Vol. 1179. – P. 15–18. – DOI: 10.1063/1.3266703.
7. Dunbar K.N. Do naive theories ever go away? Using brain imaging to understand changes in concepts / K.N. Dunbar, J.A. Fugelsang, C. Stein // *Thinking with data* / ed. by M. Lovett, P. Shah. – Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2007. – P. 315–332.
8. Dunbar K.N. How scientists think in the real world: Implications for science education / K.N. Dunbar // *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. – 2016. – P. 35–40.
9. The creative brain: Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI / A. Fink, R.H. Grabner, M. Benedek [et al.] // *NeuroImage*. – 2009. – Vol. 46, No. 4. – P. 1138–1148. – DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.02.021.
10. Functional neuroanatomy of intuitive physical inference / J. Fischer, J.G. Mikhael, J.B. Tenenbaum, N. Kanwisher // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113, No. 34. – P. E5072-E5081. – DOI: 10.1073/pnas.1610344113.
11. Fugelsang J.A. Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking / J.A. Fugelsang, K.N. Dunbar // *Neuropsychologia*. – 2005. – Vol. 43, No. 8. – P. 1204–1213.
12. Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activity during mental arithmetic / R.H. Grabner, D. Ansari, G. Reishofer [et al.] // *NeuroImage*. – 2007. – Vol. 38, No. 2. – P. 346–356. – DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.07.041.

13. Grabner R.H. Neurophysiology of mathematical cognition / R.H. Grabner, B. De Smedt // *The human sciences after the decade of the brain* / ed. by B. Battro [et al.]. – Amsterdam: Elsevier, 2012.
14. Hamrick J.B. Inferring mass in complex scenes by mental simulation / J.B. Hamrick, P.W. Battaglia, J.B. Tenenbaum // *Cognition*. – 2016. – Vol. 157. – P. 61–76.
15. Johnson-Laird P.N. Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness / P.N. Johnson-Laird. – Cambridge: Cambridge University Press, 1983. – 528 p.
16. Kozhevnikov M. Spatial visualization in physics problem solving / M. Kozhevnikov, M.A. Motes, M. Hegarty // *Cognitive Science*. – 2007. – Vol. 31, No. 4. – P. 549–579.
17. Mason R.A. Neural representations of physics concepts / R.A. Mason, M.A. Just // *Psychological Science*. – 2016. – Vol. 27, No. 6. – P. 904–913. – DOI: 10.1177/0956797616641941.
18. Mason R.A. Physics is hard, but your brain can learn it: Neural representations of physics concepts / R.A. Mason, M.A. Just // *Cognitive Neuroscience Society Annual Meeting*. – San Francisco, 2015.
19. Mason R.A. Neural representations of physics concepts in the brain: From naive to formal understanding / R.A. Mason, R.A. Schumacher, M.A. Just // *Proceedings of the 40th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. – 2018. – P. 742–747.
20. Mason R. Teaching ancient brains new tricks: Neural representations of advanced physics concepts / R. Mason, R. Schumacher, M. Just // *Physics Today*. – 2021. – Vol. 74, No. 6. – P. 30–35. – DOI: 10.1063/PT.3.4769.
21. Miller G.A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two / G.A. Miller // *The Psychological Review*. – 1956. – Vol. 63. – P. 81–97.
22. Newman S.D. The neural correlates of expertise in spatial reasoning / S.D. Newman, E. Mitchell // *Neuropsychologia*. – 2013. – Vol. 51, No. 12. – P. 2447–2456.

23. Paas F. An evolutionary upgrade of cognitive load theory: Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks / F. Paas, J. Sweller // *Educational Psychology Review*. – 2012. – Vol. 24, No. 1. – P. 27–45. – DOI: 10.1007/s10648-011-9179-2. EDN YCDJDX
24. Price G.R. Symbol processing in the left angular gyrus: Evidence from passive and active tasks / G.R. Price, D. Ansari // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2013. – Vol. 5. – P. 73–82.
25. Roos A. fMRI of physics problem solving: The role of parietal and prefrontal cortices / A. Roos, A.C. Neubauer // *Brain and Cognition*. – 2019. – Vol. 134. – P. 34–44.
26. Common and distinct brain regions in both parietal and frontal cortex support symbolic and nonsymbolic number processing in humans: A functional neuroimaging meta-analysis / H.M. Sokolowski, W. Fias, A. Moussa, D. Ansari // *NeuroImage*. – 2017. – Vol. 146. – P. 376–394.
27. Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning / J. Sweller // *Cognitive Science*. – 1988. – Vol. 12, No. 2. – P. 257–285. – DOI: 10.1207/s15516709cog1202_4.
28. Wai J. Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance / J. Wai, D. Lubinski, C.P. Benbow // *Journal of Educational Psychology*. – 2009. – Vol. 101, No. 4. – P. 817–835.