



обзорная статья

eLibrary EDN: YSKHYU

Подходы к измерению когнитивной нагрузки в современной научной литературе

Долженко Ксения Игоревна

Российский государственный педагогический университет

имени А. И. Герцена, Россия, Санкт-Петербург

eLibrary Author SPIN: 6573-8468

<https://orcid.org/0009-0008-3586-1472>

kseniadolzenko@gmail.com

Микляева Анастасия Владимировна

Российский государственный педагогический университет

имени А. И. Герцена, Россия, Санкт-Петербург

eLibrary Author SPIN: 9471-8985

<https://orcid.org/0000-0001-8389-2275>

Аннотация: Когнитивная нагрузка является ключевым фактором, влияющим на эффективность деятельности в условиях стремительного роста объемов данных, усложнения профессиональных и образовательных задач. Новизна исследования заключается в систематическом обзоре теоретических основ и методов измерения когнитивной нагрузки за период 1970–2024 гг. Цель – систематизировать существующие подходы к пониманию когнитивной нагрузки и связать каждый из них с применяемыми методами ее измерения. В результате были проанализированы ключевые концептуальные модели: ресурсная модель внимания Д. Канемана, многокомпонентная модель рабочей памяти А. Д. Бэддели и Г. Дж. Хитча, нейроэнергетическая модель А. Ф. Сандерса, теория множественных ресурсов К. Д. Уикенса, теория когнитивной нагрузки Дж. Свеллера и расширенная теория когнитивной нагрузки Ф. Пааса и коллег. Выделены четыре основные группы методов измерения: субъективные, объективные поведенческие, объективные психофизиологические и мультимодальные подходы. Создана интегративная методологическая рамка, связывающая теоретические модели с соответствующими методами измерения, что способствует преодолению фрагментарности исследовательского поля и обеспечивает более обоснованный выбор инструментов в будущих эмпирических и прикладных исследованиях. Обзор подчеркивает преимущества мультимодальных методов, которые демонстрируют наибольшую перспективность для комплексной оценки когнитивной нагрузки в современных научных исследованиях, а интегративная рамка, созданная в рамках исследования, обеспечивает обоснованный выбор инструментов для будущих работ. Результаты работы имеют значение для оптимизации образовательных процессов, повышения безопасности образовательной и профессиональной деятельности, а также разработки адаптивных цифровых систем обучения.

Ключевые слова: когнитивная нагрузка, измерение когнитивной нагрузки, теоретические модели, субъективные методы, поведенческие методы, психофизиологические методы, мультимодальные методы, рабочая память, теория множественных ресурсов, теория когнитивной нагрузки

Цитирование: Долженко К. И., Микляева А. В. Подходы к измерению когнитивной нагрузки в современной научной литературе. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки.* 2026. Т. 10. № 1. С. 1–18. <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2026-10-1-1-18>

Поступила в редакцию 01.08.2025. Принята после рецензирования 15.09.2025. Принята в печать 18.09.2025.

review article

Review of Contemporary Approaches to Measuring Cognitive Load

Kseniya I. Dolzhenko

Herzen State Pedagogical University of Russia, Russia, St. Petersburg

eLibrary Author SPIN: 6573-8468

<https://orcid.org/0009-0008-3586-1472>

kseniadolzenko@gmail.com

Anastasia V. Miklyaeva

Herzen State Pedagogical University of Russia, Russia, St. Petersburg

eLibrary Author SPIN: 9471-8985

<https://orcid.org/0000-0001-8389-2275>

Abstract: Cognitive load affects performance efficiency in conditions of rapidly growing data volumes and increasingly complex professional and academic tasks. This article introduces a systematic review of theoretical foundations and methods for measuring cognitive load reported in 1970–2024. The research objective was to systematize the existing approaches to understanding cognitive load and connect each of them to the applied measurement methods. The key conceptual models included D. Kahneman's capacity theory, A. D. Baddeley and G. J. Hitch's model of working memory, A. F. Sanders' cognitive-energetic model of stress and human performance, C. D. Wickens' multiple

resource theory, J. Sweller's cognitive load theory, and the expanded cognitive load theory by F. Paas et al. The four main groups of measurement methods included subjective, objective-behavioral, objective-psychophysiological, and multimodal approaches. The authors developed an integrative methodological framework to link the theoretical models with the corresponding measurement methods. By de-fragmentizing the research field, the framework provided a more informed choice of tools for empirical and applied studies. Multimodal methods proved to be more advantageous since they ensured a more comprehensive assessment of cognitive load in modern scientific research. The results may be used to increase academic efficiency, improve the safety of academic and professional activities, and develop new adaptive digital learning systems.

Keywords: cognitive load, cognitive load measurement, theoretical models, subjective methods, behavioral methods, psychophysiological methods, multimodal methods, working memory, multiple resources theory, cognitive load theory

Citation: Dolzhenko K. I., Miklyaeva A. V. Review of Contemporary Approaches to Measuring Cognitive Load. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye i obshchestvennye nauki*, 2026, 10(1): 1–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2026-10-1-1-18>

Received 1 Aug 2025. Accepted after review 15 Sep 2025. Accepted for publication 18 Sep 2025.

Введение

В контексте стремительного роста объемов данных, усложнения профессиональных и образовательных задач, а также интенсивного развития информационно-коммуникационных технологий, проблема когнитивной нагрузки приобретает особую значимость. Устойчиво растет интерес исследователей и практиков к оптимизации учебных и профессиональных сценариев, направленной на максимизацию продуктивности при минимизации когнитивных затрат и повышение общей эффективности деятельности. Эта тенденция обусловлена необходимостью адаптации человека к возрастающим информационным нагрузкам, предъявляющим повышенные требования к когнитивной системе [1].

Эмпирический фундамент понимания ограничений рабочей памяти заложило исследование Дж. А. Миллера, установившее предел ее емкости в 7 ± 2 единицы информации [2]. Последующее развитие представленного направления связано с работой Д. Канемана, предложившего ресурсную модель внимания (Capacity model of attention) [3]. Согласно этой модели, внимание представляет собой единый и ограниченный ресурс, гибко распределенный между когнитивными задачами. Ключевым аспектом данной теории является концепция общего пула ресурсов (Capacity pool) – неспецифического резерва умственной энергии, объем которого варьируется в зависимости от уровня физиологического возбуждения (Arousal). Распределение ресурсов детерминируется взаимодействием факторов: устойчивых диспозиций (Enduring dispositions), отражающих непроизвольное внимание к значимым стимулам; мгновенных намерений (Momentary intentions), связанных с сознательными целями; оценкой требований (Evaluation of demands) выполняемой задачи; эффекта практики (Effects of practice). Особую значимость в модели Д. Канемана имеет концепция усилия

(Effort) – субъективного переживания мобилизации ресурсов для выполнения задачи. Усилие напрямую связано с количеством выделенных ресурсов и может служить индикатором когнитивной нагрузки.

Качественно новый этап связан с появлением многокомпонентной модели рабочей памяти А. Д. Бэддели и Г. Дж. Хитча (The working memory model), представляющей ее как систему взаимодействующих подсистем с ограниченной пропускной способностью [4]. Модель включает четыре основных компонента: 1) центральный исполнитель (Central executive) – система управления вниманием с ограниченной емкостью, отвечающая за координацию деятельности подчиненных систем; 2) фонологическая петля (Phonological loop), специализирующаяся на временном хранении и обработке вербальной и акустической информации; 3) визуально-пространственный блокнот (Visuospatial sketchpad), обеспечивающий манипулирование зрительной и пространственной информацией; 4) эпизодический буфер (Episodic buffer), представляющий собой систему интеграции информации из различных источников в единые когерентные репрезентации [5]. Когнитивная нагрузка возникает в тех случаях, когда требования выполняемой задачи приближаются к предельным возможностям того или иного компонента системы или превышают их [6].

Нейроэнергетическая модель А. Ф. Сандерса (Cognitive-energetic model of stress and human performance) интегрировала представления о стадиях обработки информации с энергетическими механизмами и стала следующим этапом развития теории когнитивной нагрузки [7]. Центральным постулатом модели является представление о том, что каждый этап обработки информации связан с определенными энергетическими затратами и модуляцией со стороны

механизмов возбуждения и усилия. Модель выделяет последовательные стадии обработки информации: препроцессинг (Preprocessing), извлечение признаков (Feature extraction), идентификацию (Identification), выбор ответа (Response choice) и программирование моторики (Motor programming). Каждая из стадий подвержена влиянию трех энергетических механизмов: *возбуждения* (связанного с общим уровнем физиологической активации), *активации* (обеспечивающего подготовку к конкретному ответу) и *усилия* (сознательно контролируемого механизма мобилизации дополнительных ресурсов). Модель А. Ф. Сандерса предлагает концепцию компенсаторных механизмов, согласно которой человек может компенсировать неблагоприятные условия или высокую когнитивную нагрузку за счет мобилизации дополнительных усилий. Однако данный компенсаторный механизм имеет свои пределы, и длительное или чрезмерное усилие приводит к когнитивной перегрузке, истощению энергетических ресурсов и к ухудшению работоспособности.

Дальнейшее развитие теории когнитивной нагрузки произошло в работах К. Д. Уикенса. Теория множественных ресурсов (Multiple resource theory, MRT), разработанная ученым, объясняет механизмы распределения когнитивных ресурсов в условиях многозадачной деятельности [8]. Внимание человека в этой модели состоит из нескольких относительно независимых пулов ресурсов, организованных в многомерную структуру и основывающихся на четырех измерениях, определяющих степень интерференции между одновременно выполняемыми задачами: *стадиях обработки информации* (разделяет процессы на восприятие, когнитивные операции, ответные реакции); *модальностях ввода* (разделяет информацию на зрительную и слуховую); *кодах обработки информации* (разграничивает пространственную и вербальную репрезентацию данных); *каналах ответа* (выделяет мануальные и речевые реакции) [9]. Способность человека к эффективному выполнению нескольких задач одновременно определяется степенью пересечения требований этих задач к различным ресурсным пулам. Чем больше задачи «разнесены» в многомерном пространстве ресурсов, тем меньше будет взаимная интерференция и когнитивная нагрузка.

Парадигмальный сдвиг в концептуализации когнитивной нагрузки произошел с формулированием Дж. Свеллером теории когнитивной нагрузки (Cognitive load theory), интегрировавшей достижения когнитивной психологии в образовательный контекст. Центральным постулатом теории является положение об ограниченности ресурсов рабочей памяти при обработке новой информации [10]. Дж. Свеллер предложил рассматривать

когнитивную нагрузку как многомерный конструкт, определяющий количество ментальных ресурсов, затрачиваемых на выполнение конкретной задачи. Вкладом теории стало выделение трех типов когнитивной нагрузки:

1) **внутренняя когнитивная нагрузка** (Intrinsic cognitive load) определяется объективной сложностью изучаемого материала и зависит от количества элементов информации, которые должны обрабатываться одновременно в рабочей памяти для понимания содержания;

2) **внешняя когнитивная нагрузка** (Extraneous cognitive load) возникает вследствие неоптимальной организации учебного процесса и неадекватных способов представления информации;

3) **релевантная когнитивная нагрузка** (Germane cognitive load) связана с когнитивными процессами, непосредственно направленными на построение и автоматизацию когнитивных схем в долговременной памяти [11].

Важным теоретическим постулатом является аддитивность трех типов нагрузки: общая когнитивная нагрузка представляет собой сумму внутренней, внешней и релевантной нагрузок. При этом если суммарная нагрузка превышает доступные ресурсы рабочей памяти, эффективность обучения резко снижается [12].

Развитие теории когнитивной нагрузки привело к появлению более комплексных моделей. Одним из наиболее значимых расширений классической теории стала работа Ф. Пааса, П. Айреса и М. Пахмана, где авторы, опираясь на модель Ф. Пааса и Й. Ван Мерриенбура, определяют когнитивную нагрузку как многомерный конструкт, возникающий из динамического взаимодействия характеристик задачи и обучающегося. Данный конструкт включает оценочное измерение, объединяющее объективную умственную нагрузку (обусловленную требованиями задачи), субъективное умственное усилие (затрачиваемое обучаемым) и продуктивность деятельности (измеряемую через удержание, воспроизведение и перенос знаний). Исследователи подчеркивают, что на когнитивную нагрузку влияют не только отдельные характеристики задачи (сложность, темп, использование мультимедиа) или обучаемого (экспертность в данной области, возраст, пространственные способности и др.), но и их системное взаимодействие. Так, задачи с жесткими целями (goal-specific tasks) ухудшают результаты пожилых людей, в то время как задачи без жестких целей (goal-free tasks) их улучшают, а преимущества смешанного представления информации (визуальное + вербальное представление) доступны лишь обучающимся с высокими пространственными способностями [13].

Особую значимость проблема когнитивной нагрузки приобретает в контексте развития адаптивных цифровых платформ – от образовательных систем, подстраивающихся под индивидуальные особенности обучающегося, что было исследовано в работах по адаптивному обучению, до сложных человеко-машинных интерфейсов [14]. В связи с этим объективная диагностика и управление когнитивными ресурсами становятся ключевыми факторами успешности деятельности. Запрос на объективные методы диагностики когнитивной нагрузки становится все более острым, поскольку, согласно исследованиям Дж. Свеллера, перегрузка рабочей памяти может существенно снижать эффективность обучения и выполнения сложных задач [15]. Как подчеркивают Ф. Паас и коллеги, разработка надежных методов измерения когнитивной нагрузки становится одной из приоритетных задач когнитивной психологии, педагогической психологии и эргономики [16].

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, следует подчеркнуть отсутствие единого понятия *когнитивная нагрузка* и единой методологической базы для ее измерения. А. Д. Бэддели связывает это с междисциплинарным характером проблемы, находящейся на стыке когнитивной психологии, нейронаук и информатики, а также с многообразием подходов к пониманию этого феномена [17]. На данный момент различные исследовательские группы опираются на несовпадающие концептуальные рамки, а также отсутствует общепринятая классификация методов измерения когнитивной нагрузки, что затрудняет выбор адекватных инструментов для конкретных исследовательских и прикладных задач.

Цель работы – систематизировать существующие подходы к пониманию когнитивной нагрузки и связать каждый из них с применяемыми методами ее измерения.

Задачи:

1. Провести обзор научных источников за период 1970–2024 гг., посвященных проблематике измерения когнитивной нагрузки, с использованием международных (Web of Science, Scopus) и отечественных (РИНЦ, КиберЛенинка) наукометрических баз.

2. Выделить ключевые теоретические школы и концептуальные подходы к пониманию когнитивной нагрузки, включая работы Дж. Свеллера, А. Д. Бэддели, Г. Дж. Хитча, Д. Канемана, К. Д. Уикенса, А. Ф. Сандерса и др.

3. Описать соответствующие этим теоретическим подходам измерительные процедуры, включая субъективные, объективные поведенческие, объективные психофизиологические и мультимодальные методы.

4. Создать интегративную методологическую рамку, связывающую теоретические модели с соответствующими методами измерения.

Актуальность работы обусловлена двумя ключевыми аспектами. Во-первых, существующая фрагментированность исследовательского поля препятствует обоснованному выбору методологии. Ученые зачастую применяют методы измерения, не соотнося их с теоретическими основаниями понимания когнитивной нагрузки. Во-вторых, отсутствует единая классификация измерительных подходов, связывающая концептуальные модели изучения когнитивной нагрузки с соответствующим методологическим инструментарием, что затрудняет сравнение результатов различных экспериментальных исследований.

В отличие от предшествующих обзоров, фокусированных преимущественно на отдельных категориях методов, например, работы о субъективных методиках [16] или исследованиях физиологических индикаторов [18], настоящее исследование предлагает целостный подход к проблеме измерения когнитивной нагрузки. Данный подход интегрирует концептуальные основы феномена с соответствующим методологическим инструментарием. Как справедливо отмечают ученые в области когнитивной психологии, такой междисциплинарный синтез, предполагающий интеграцию различных концептуальных подходов к пониманию когнитивной нагрузки и установление на этой основе четких взаимосвязей между теоретическими конструктами и соответствующими им методами измерения, позволяет преодолеть фрагментированность исследовательского поля и создать основу для более обоснованного выбора методологии в зависимости от теоретической позиции ученого. В результате появляется возможность систематизации разрозненных концепций когнитивной нагрузки и построения единой классификации измерительных подходов, что вносит вклад в развитие методологии когнитивной науки, позволяя, согласно подходу Р. Морено, более целостно представить эволюцию научных взглядов на природу когнитивных процессов и их ограничений [19].

Методы и материалы

В качестве основного исследовательского метода был выбран систематический обзор литературы. В анализируемый корпус статей вошли работы 1970–2024 гг. включительно. Данный период был выбран для охвата современных подходов и активного развития методологии измерения когнитивной нагрузки. Дополнительно в анализ целенаправленно включались основополагающие (классические) работы по теории когнитивной нагрузки и ранним методам ее оценки для обеспечения полноты

теоретического контекста. Основными источниками публикаций выступили включенные в электронные библиографические базы Google Scholar, PubMed и eLIBRARY.RU.

Отбор и анализ публикаций проводился на русском и английском языках осенью 2024 г. Поисковый запрос содержал следующие слова и словосочетания: на английском языке: *cognitive load, mental effort, cognitive load measurement, mental effort measurement, pupillometry and cognitive load, fNIRS and cognitive load, dual-task and cognitive load, NASA-TLX* и др.; на русском языке: *когнитивная нагрузка, умственное усилие, измерение когнитивной нагрузки, пупиллометрия и когнитивная нагрузка, фМРТ и когнитивная нагрузка, метод двойной задачи и когнитивная нагрузка, NASA-TLX и когнитивная нагрузка* и др.

Общая база проанализированных публикаций включала в себя 263 работы. Далее для отбора статей, релевантных содержанию поставленной проблемы, были использованы следующие критерии:

- 1) рецензируемые научные статьи (оригинальные эмпирические исследования, обзоры) и монографии;
- 2) публикации, основной фокус которых направлен на теоретические аспекты или экспериментальные методы измерения когнитивной нагрузки;
- 3) исследования, представляющие или обсуждающие конкретные методики (субъективные, объективные (поведенческие и психофизиологические), мультимодальные) для оценки когнитивной нагрузки.

В результате для систематического обзора из общего массива было выбрано 86 статей, которые соответствуют вышеизложенным критериям.

Результаты

Субъективные методы

Субъективные методы измерения когнитивной нагрузки основываются на самоотчетах участников исследования о переживаемом ими уровне умственного усилия, сложности задачи или напряжения во время выполнения когнитивных задач. Теоретической основой данной группы методов выступает положение о том, что индивид способен к интроспективной оценке собственных когнитивных ресурсов и может количественно выразить субъективное переживание когнитивной нагрузки. Субъективные методы характеризуются простотой реализации, неинвазивностью и возможностью применения в широком спектре экспериментальных и прикладных условий.

Классическим инструментом стала **однопунктовая шкала Ф. Пааса** (1992 г.) [20]. Респондентам предлагается оценить воспринимаемую сложность задачи или затраченные умственные усилия по 9-балльной шкале от *очень, очень низкие* до *очень,*

очень высокие. Несмотря на кажущуюся простоту, данная методика продемонстрировала высокую валидность и надежность в многочисленных исследованиях, основанных на принципах теории когнитивной нагрузки. В работе Ф. Пааса и Й. Ван Мерриенбура было определено, что субъективные оценки умственных усилий коррелируют с объективными показателями выполнения задач и могут служить валидным индикатором когнитивной нагрузки [21]. Авторы провели эксперимент с участием 60 студентов, изучавших курс программирования, которые были случайным образом распределены в группы с проработанными примерами или с возможностью самостоятельного решения задач. Группа с проработанными примерами показала значительно более низкую когнитивную нагрузку по сравнению с группой самостоятельного решения, при этом демонстрируя лучшие результаты на этапе переноса знаний.

Дальнейшее развитие данного метода произошло с появлением **методики Ф. Пааса и Й. Ван Мерриенбура** для оценки когнитивной нагрузки, которая представляет собой двумерный подход, сочетающий субъективную оценку умственного усилия с объективными показателями производительности [22]. Участники оценивают затраченное умственное усилие по 9-балльной шкале сразу после выполнения каждой задачи. Уникальность методики заключается в вычислении индекса эффективности обучения, объединяющего субъективные и объективные данные в единый показатель когнитивной нагрузки.

Наиболее распространенный инструмент субъективной оценки когнитивной нагрузки – **шкала NASA Task Load Index (NASA-TLX)**, разработанная С. Г. Хартом и Л. Е. Ставелэндом [23]. Методика представляет собой многомерный инструмент, оценивающий шесть аспектов субъективной рабочей нагрузки: *умственные требования* (Mental demand), *физические требования* (Physical demand), *временные требования* (Temporal demand), *усилие* (Effort), *производительность* (Performance) и *фрустрацию* (Frustration). Каждый параметр оценивается по 100-балльной шкале шагом в 5 баллов, после чего производится взвешивание оценок на основе парных сравнений важности каждого фактора для конкретной задачи. Итоговый индекс NASA-TLX рассчитывается как взвешенная сумма всех компонентов. Применение NASA-TLX в исследованиях когнитивной нагрузки демонстрирует его эффективность в различных теоретических парадигмах. В рамках теории когнитивной нагрузки Дж. Свеллера методика использовалась для валидации эффектов различных инструкционных дизайнов. П. Чандлер и Дж. Свеллер установили, что участники, работавшие с интегрированными учебными материалами, демонстрировали

значительно более низкие показатели по шкале NASA-TLX по сравнению с группой, изучавшей разделенные материалы, что подтверждает положения теории о влиянии внешней когнитивной нагрузки на субъективное переживание сложности задачи [24].

В исследованиях, опирающихся на теорию множественных ресурсов К. Д. Уикенса, NASA-TLX применялся для оценки интерференции между одновременно выполняемыми задачами. Работа Д. де Винтера и коллег в области автомобильной эргономики продемонстрировала, что водители сообщали о значительно более высокой когнитивной нагрузке при выполнении вторичных задач, требующих использования тех же ресурсных пулов, что и основная задача управления автомобилем [25]. Исследование С. Г. Харта и Дж. Р. Хаузера демонстрирует применение NASA-TLX для оценки рабочей нагрузки в условиях полета, где командир и второй пилот выполняли множество одновременных задач, задействующих различные пулы ресурсов согласно теории К. Д. Уикенса. Результаты показали значимые корреляции между субъективными оценками нагрузки и объективной сложностью задач во время полета, что подтверждает валидность субъективных методов в контексте многозадачной деятельности [26]. Эти исследования подтверждают предположения теории множественных ресурсов о специфичности когнитивных ресурсов и их конкуренции.

Шкала оценки умственного усилия (Rating Scale Mental Effort, RSME), разработанная Ф. Р. Х. Зийлстрой, представляет собой одномерный инструмент для оценки воспринимаемого умственного усилия [27]. Методика использует непрерывную 150-мм визуально-аналоговую шкалу с вербальными якорями от *совсем не требует усилий* до *чрезвычайно высокое усилие*. Теоретической основой RSME выступают представления о регуляции когнитивных ресурсов, восходящие к работам Д. Канемана о связи субъективного усилия и затрат внимания [28]. Применение RSME в экспериментальных исследованиях продемонстрировало его чувствительность к манипуляциям сложности задач. В работе Ф. Пааса и Й. Ван Мерринбура, посвященной эффекту разделенного внимания в геометрических задачах, участники, работавшие с интегрированными схемами, показали значительно более низкие оценки по шкале RSME по сравнению с группой, изучавшей разделенные диаграммы. Это подтверждает положения теории когнитивной нагрузки о влиянии способа представления информации на субъективное переживание сложности [21].

Альтернативным инструментом оценки когнитивной нагрузки является **методика SWAT (Subjective Workload Assessment Technique)**, разработанная

Г. Б. Ридом и Т. Е. Найгреном [29]. Этот метод представляет собой стандартизованную двухэтапную процедуру, включающую ранжирование (Card sorting) 27 возможных комбинаций по трем ключевым измерениям нагрузки: *временным ограничениям* (Time load), *когнитивным требованиям* (Mental effort load) и *психологическому стрессу* (Psychological stress load). Каждое измерение имеет три уровня (низкий, средний, высокий). На втором этапе – непосредственной оценке – после выполнения задачи испытуемый выбирает одну из 27 комбинаций, которая наилучшим образом описывает его состояние. На основе индивидуальной шкалы, полученной на первом этапе, этот выбор конвертируется в итоговый показатель нагрузки по интервальной шкале от 0 до 100. Методика SWAT нашла широкое применение в различных областях, включая авиакосмическую сферу, медицинскую диагностику, когнитивные исследования (изучение многозадачности).

Профиль рабочей нагрузки (Workload profile (WP)) – многомерный инструмент для оценки субъективной умственной нагрузки, созданный на основе модели множественных ресурсов К. Д. Уикенса, который оценивает 8 компонентов нагрузки: визуальную, слуховую, пространственную, вербальную обработку; реактивное и когнитивное управление; моторные действия и речевой вывод. После выполнения задачи испытуемый оценивает затраты усилий по каждому компоненту, и на основании суммы оценок по всем шкалам вычисляется итоговый показатель когнитивной нагрузки [30]. Профиль рабочей нагрузки пытается объединить преимущества процедур, основанных на выполнении вторичных задач и субъективных методов. В исследовании С. Рубио и коллег был произведен анализ и сравнение характеристик трех мер субъективного измерения когнитивной нагрузки: NASA-TLX, SWAT и WP. Было установлено, что профиль рабочей нагрузки был более чувствительным, валидным и высокодиагностичным инструментарием в сравнении с остальными методиками [31].

Еще одним инструментом субъективной оценки являются *метакогнитивные суждения*, которые широко используются для изучения процессов мониторинга рабочей памяти. А. Кориат и Р. Леви-Садот обнаружили, что точность метакогнитивных суждений зависит от объема рабочей памяти участников: люди с большим объемом рабочей памяти продемонстрировали более точную калибровку между субъективной уверенностью и фактической производительностью [32]. Это исследование показало важность индивидуальных различий в способности к метакогнитивному мониторингу.

Субъективные методы оценки когнитивной нагрузки, основанные на самоотчете, представляют

собой валидный и надежный инструмент диагностики, что подтверждается их корреляцией с объективными показателями производительности и теоретическими положениями когнитивных теорий. Применение таких методик, как шкала Ф. Пааса, NASA-TLX, RSME, SWAT, профиль рабочей нагрузки (WP) и метакогнитивные суждения, демонстрирует их высокую чувствительность к манипуляциям сложностью задач, а также диагностическую ценность в различных экспериментальных и прикладных контекстах, что делает их важным инструментом в исследованиях когнитивных процессов.

Объективные поведенческие методы

Наиболее прямым и исторически первым способом объективной оценки когнитивной нагрузки является **анализ показателей производительности деятельности**. Подход основан на предположении, что рост когнитивной нагрузки приводит к снижению продуктивности и увеличению времени выполнения задач. Показатели производительности включают время выполнения задания, количество правильных ответов, число ошибок и правильно решенных заданий. В рамках ресурсной модели внимания Д. Канемана снижение точности при усложнении задачи интерпретируется как перераспределение ограниченного пула ресурсов. Исследование в рамках теории множественных ресурсов К. Д. Уикенса, где производительность пилотов в симуляторе снижалась при одновременном отслеживании трех дисплеев, демонстрирует, что однородные каналы переработки конкурируют сильнее, чем гетерогенные [33]. В модели рабочей памяти А. Д. Бэддели точность воспроизведения серий слогов служит индикатором нагрузки «фонологической петли». П. Барруйе и В. Камос доказали линейное снижение правильных ответов по мере увеличения темпа предъявления отвлекающих арифметических заданий, подтверждая концепцию "time-based resource-sharing" [34].

В рамках теории Дж. Свеллера показатели производительности выступают ключевым критерием эффективности, т.к. снижение избыточной когнитивной нагрузки, не связанной с сутью учебного материала, высвобождает ресурсы рабочей памяти для более глубокой обработки информации. Примером является исследование Дж. Свеллера и Г. А. Купера, демонстрирующее преимущество работы с решенными примерами. Студенты, обучавшиеся с помощью решенных примеров, тратили значительно меньше времени на решение тестовых задач по сравнению с контрольной группой, кроме того, сокращение времени решения сопровождалось уменьшением количества математических ошибок, что интерпретировалось как индикатор меньшей когнитивной нагрузки [35].

Наконец, Ф. Пасс и коллеги в своей работе описали, что вовлеченность и мотивация обучающихся также являются факторами, влияющими на когнитивную нагрузку. Они показали, что падение продуктивности в условиях высокой эмоциональной напряженности сопровождается ростом субъективного стресса, тем самым интегрировали аффективный компонент в поведенческий индикатор с помощью формулы учебного участия [13].

Анализ времени реакции как отдельный показатель также широко применяется для измерения когнитивной нагрузки. В исследовании зрительного поиска С. Стенберга была продемонстрирована линейная зависимость между количеством элементов в рабочей памяти и временем реакции, что стало основой для использования латентности ответов как индикатора когнитивной нагрузки [36]. Согласно модели Д. Канемана, регулирование целей и действий требует работы компенсаторного механизма управления, который динамически распределяет ресурсы. Исследование Г. Р. Д. Хоккей показало, что увеличение времени реакции в задачах на бдительность коррелирует с повышением уровня стресса и истощением энергетических ресурсов [37]. В контексте нейроэнергетической модели А. Ф. Сандерса показатели производительности приобретают дополнительное измерение. Модель предполагает, что длительная или интенсивная нагрузка ведет к истощению ресурсов, что проявляется не только в снижении точности, но и в замедлении реакций и увеличении их вариабельности. В исследовании К. А. Брукхейса и Д. де Ваарда анализ вариабельности ответов позволяет диагностировать состояние оператора в динамике. В работе было определено, что анализ вариабельности времени реакции в задачах обнаружения периферических стимулов позволяет эффективно оценивать умственную нагрузку водителей [38]. Теория множественных ресурсов К. Д. Уикенса, постулирующая существование независимых пулов ресурсов (например, вербальных и пространственных), также находит подтверждение в анализе времени реакции. Д. Е. Мейер и Д. Е. Кирас в рамках разработки вычислительной теории исполнительных когнитивных процессов продемонстрировали, что временные издержки переключения между задачами являются функцией сходства задач по различным когнитивным измерениям, что согласуется с положениями теории множественных ресурсов [39].

Метод двойной задачи является более сложным и информативным инструментом, позволяющим оценить ресурсоемкость основной задачи через анализ интерференции с одновременно выполняемой вторичной задачей. Данный метод был теоретически обоснован в работе Д. Канемана [3]. Этот метод основан на принципе конкуренции за ограниченные

ресурсы внимания между одновременно выполняемыми задачами. Снижение производительности во второстепенной задаче при выполнении основной интерпретируется как показатель ресурсоемкости последней. Д. А. Норман и Д. Г. Бобров продемонстрировали эффективность представленного подхода для различения процессов, ограниченных данными (data-limited) и ресурсами (resource-limited) [40]. В исследованиях, использующих парадигму двойной задачи, испытуемые выполняют основную экспериментальную задачу одновременно с простой вторичной задачей. Увеличение времени реакции или снижение точности выполнения вторичной задачи указывает на возрастание когнитивной нагрузки основной задачи. С развитием модели рабочей памяти А. Д. Бэддели метод двойной задачи стал ключевым инструментом для диссоциации ее подсистем: фонологической петли, визуально-пространственного блокнота и центрального исполнителя. Именно таким путем была доказана независимость вербальной и пространственной подсистем.

Исследование Р. Х. Логи стало одним из первых систематических изучений методом двойной задачи визуально-пространственной рабочей памяти и продемонстрировало ключевые принципы ее функционирования [41]. Так, участники выполняли задачи на запоминание визуальных и пространственных паттернов при одновременном выполнении различных интерферирующих задач. Результаты показали, что визуальные задачи избирательно нарушали обработку визуальной информации, в то время как пространственные задачи специфически влияли на пространственную обработку.

В рамках нейроэнергетической модели А. Ф. Сандерса метод двойной задачи позволяет исследовать стратегии распределения усилий и компенсаторные механизмы. Снижение производительности во вторичной задаче при сохранении производительности в первичной указывает на мобилизацию дополнительных усилий [42]. Аналогичные результаты были получены в работе, где использовалась парадигма двойной задачи для оценки влияния возраста на распределение внимания [43].

Теория множественных ресурсов К. Д. Уикенса является прямым развитием идей о специфичности ресурсов. Исследование К. Д. Уикенса демонстрирует применение данного подхода для изучения совместимости стимула, центральной обработки и ответа [44]. В экспериментальных сериях систематически варьировались характеристики задач согласно измерениям теории множественных ресурсов, включая модальность предъявления стимула и тип требуемого ответа. Результаты показали, что комбинации задач, не создающие конфликта ресурсов

(например, две зрительно-вербальные задачи), приводят к значительно большему падению производительности по сравнению с комбинациями, использующими разные ресурсные пулы (зрительно-пространственная и слухо-вербальная задачи). Этот же подход эффективно применяется для оценки нагрузки в сложных средах, например, в рамках теории когнитивной нагрузки. Снижение производительности во вторичной задаче указывает на высокую когнитивную нагрузку от основной деятельности. Р. Брюнкен и соавторы использовали этот метод для оценки нагрузки при мультимедийном обучении [45].

Помимо общих подходов, для оценки нагрузки на конкретные когнитивные механизмы, прежде всего компоненты рабочей памяти, были разработаны специализированные методики, например, **анализ паттернов ошибок**. В контексте модели рабочей памяти А. Д. Бэддели тип ошибки может прямо указывать на перегруженный компонент. Исследование Р. Конрада и А. Д. Халла показало, что при перегрузке фонологической петли наблюдается характерный паттерн фонологически обусловленных ошибок, таких как замена целевых стимулов на фонологически схожие варианты [46]. Стоит отметить, что при превышении емкости визуально-пространственного блокнота типичными будут являться ошибки пространственного позиционирования элементов, в то время как перегрузка центрального исполнителя проявляется в виде ошибок планирования и способности подавления нерелевантных реакций. Эта логика находит свое продолжение и в нейроэнергетической модели А. Ф. Сандерса, где типы ошибок соотносятся с нарушением определенных стадий обработки информации. Исследование показало, что различные типы ошибок (пропуски, ложные тревоги, персеверации) отражают специфические нарушения в различных стадиях обработки информации [47], а также была продемонстрирована связь между паттернами ошибок в задачах устойчивого внимания и уровнем стресса [48].

Для дозированного измерения нагрузки на центральный исполнитель и процессы обновления информации в рабочей памяти используются **задачи типа N-назад (N-back)**, обеспечивающие точное дозирование нагрузки на процессы обновления информации в рабочей памяти. Их значимость выходит за рамки простого измерения. Исследование С. Йегги и коллег с использованием модификаций N-back задач продемонстрировало, что когнитивная тренировка рабочей памяти с помощью задачи "dual N-back" способна значительно улучшить подвижный интеллект (Gf) за счет увеличения емкости рабочей памяти, который ранее считался практически неизменной характеристикой [49]. Ключевым механизмом этого переноса

является тренировка исполнительных процессов, особенно контроля внимания и способности управлять несколькими задачами одновременно, что критически важно для выполнения задач на интеллект. Валидность этого инструмента подтверждается нейробиологическими данными. Нейровизуализационные исследования с применением функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) подтверждают валидность N-back задач как инструмента измерения когнитивной нагрузки. Метааналитическая работа А. М. Оуэна и др. продемонстрировала линейное увеличение активации фронто-париетальной сети контроля, ответственной за процессы рабочей памяти, исполнительного контроля и когнитивной гибкости [50]. Именно эти области мозга активируются при выполнении задач типа N-back и других когнитивных тестов, требующих манипулирования информацией в рабочей памяти. Измерение нагрузки на центральный исполнитель также возможно через комплексные задачи на объем рабочей памяти. Исследование П. Шах и А. Мияке представило демонстрацию измерения нагрузки на центральный исполнитель посредством использования задач на объем рабочей памяти с варьированием требований к обработке информации [51]. Авторы показали, что увеличение сложности операций обработки в задаче *чтение плюс запоминание* приводит к пропорциональному снижению объема запоминаемого материала, что свидетельствует о конкуренции за ресурсы центрального исполнителя.

Наконец, **анализ стратегий решения** представляет собой качественный метод, позволяющий заглянуть в «черный ящик» когнитивных процессов. Анализ стратегий решения предполагает качественный анализ протоколов мышления вслух и пошаговых решений, что может выявить когнитивные процессы и уровень нагрузки. Данный метод (хотя и является трудоемким) незаменим для понимания того, как именно возникает нагрузка в рамках теории когнитивной нагрузки и как центральный исполнитель модели А. Бэддели организует деятельность. К. А. Эриксон и Г. А. Саймон заложили методологические основы данного подхода для изучения когнитивных процессов в обучении [52].

Стоит отметить, что новейшие теоретические рамки, такие как расширенная теория когнитивной нагрузки Ф. Пааса, П. Айреса и М. Пахман, подчеркивают взаимосвязь когнитивной нагрузки с аффективными и мотивационными состояниями. Это ставит перед исследователями новую задачу – разработку комплексных методик, способных одновременно оценивать поведенческие проявления нагрузки и их эмоционально-мотивационные корреляты, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

Объективные психофизиологические методы

Традиционно оценка когнитивной нагрузки в большинстве исследований опиралась на субъективные шкалы и показатели успешности выполнения деятельности. Однако эти методы имеют известные ограничения, связанные с рефлексивной природой самоотчета и возможным влиянием самой измерительной процедуры на производительность. В связи с этим все большее значение приобретают объективные психофизиологические методы, позволяющие в реальном времени регистрировать физиологические корреляты умственных усилий, не вторгаясь в основной когнитивный процесс.

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) представляет собой показатель, отражающий баланс симпатической и парасимпатической активности автономной нервной системы. Г. Малдер описал методы измерения умственного усилия. Одним из методов измерения являлись: вариабельность сердечного ритма; частота сердечных сокращений. Увеличение умственного усилия сопровождается изменениями в вариабельности сердечного ритма и частоте сердечных сокращений (ЧСС). Снижение ВСР и учащение пульса рассматриваются как индикаторы возрастания когнитивной нагрузки, отражающие активацию симпатического отдела автономной нервной системы [53]. П. Г. А. М. Йорн установил, что спектральные показатели ВСР значимо изменяются при выполнении задач различной сложности, что позволяет использовать их как индикаторы когнитивной нагрузки в реальном времени [54]. Н. Хьортсков и коллеги продемонстрировали, что параметры ВСР эффективно отражают изменения в динамике умственной нагрузки при выполнении когнитивных задач различной сложности [55]. Дж. Ф. Тайер и Р. Д. Лейн показали тесную связь между вариабельностью сердечного ритма и исполнительными когнитивными функциями, подчеркнув роль автономной нервной системы в когнитивном контроле [56]. Р. Кастальдо и соавторы в систематическом обзоре подтвердили эффективность ВСР как неинвазивного биомаркера для оценки острого стресса и когнитивной нагрузки в различных условиях [57]. Более поздний обзор Г. Форте и коллег дополнительно валидизировал использование параметров ВСР для количественной оценки когнитивной нагрузки в реальных рабочих условиях, что делает этот метод особенно ценным для практического применения [58].

Пупиллометрия – метод измерения изменений диаметра зрачка, являющийся прямым отражением активации симпатической нервной системы при возрастании когнитивной нагрузки. В работе Д. Канемана и Дж. Битти была установлена линейная зависимость между нагрузкой на рабочую память и расширением зрачка, что подтверждает тезисы ресурсной модели

внимания [59]. Последующие исследования Дж. Битти расширили понимание возможностей *пупиллометрии*, продемонстрировав ее чувствительность к различным типам когнитивной нагрузки, включая арифметические вычисления, вербальное рассуждение и пространственную обработку информации [60].

Дж. Клиггер и коллеги использовали комбинацию пупиллометрии и айтрекинга для оценки когнитивной нагрузки при взаимодействии с компьютерными интерфейсами, где диаметр зрачка коррелировал с субъективными оценками ментального усилия [61]. Исследование Н. Ансворта и М. К. Робинсона изучало динамику зрачковой реакции при выполнении задания на производительность рабочей памяти. Задача участников состояла в том, чтобы запомнить цвета квадратов с короткими задержками и сообщить цвета этих квадратов на тестовом экране. Результаты показали, что диаметр зрачка увеличивался пропорционально количеству удерживаемых в памяти элементов, а также демонстрировал характерное сужение при извлечении информации. Важно, что индивидуальные различия в базовом диаметре зрачка и амплитуде его изменений коррелировали с емкостью рабочей памяти, что подтверждает связь между пупиллометрическими показателями и функционированием центрального исполнителя в модели А. Д. Бэддели [62].

Исследование М. А. Рекарте и Л. М. Нунеса иллюстрирует применение пупиллометрии и анализа зрительного поиска в контексте оценки когнитивной нагрузки при вождении [63]. Вождение представляет собой комплексную многозадачную деятельность, требующую распределения ресурсов по различным модальностям и кодам обработки согласно теории К. Д. Уикенса. Результаты показали, что увеличение умственной нагрузки при выполнении вторичной когнитивной задачи во время вождения приводило к значимым изменениям диаметра зрачка и сужению поля зрительного поиска, что косвенно подтверждает концепцию ограниченности ресурсов внимания. В контексте образовательных технологий показательным стало исследование М. Родемера и коллег, которое демонстрирует, что использование измерения размера зрачка открывает дополнительные возможности для мониторинга когнитивной нагрузки в процессе обучения. В отличие от традиционных самоотчетных методов, психофизиологические метрики позволяют фиксировать изменения когнитивного состояния обучающихся в реальном времени, не полагаясь на их субъективное восприятие. Авторы работы показали, что интеграция подобных методов в образовательные исследования способствует получению более точных и достоверных данных о механизмах переработки информации, когнитивной нагрузке и эффективности различных

подходов к обучению, в частности при изучении сложных химических представлений с помощью обучающих видеоматериалов [64].

Технология **айтрекинга (eye-tracking)** представляет собой высокоточный инструментальный метод, обеспечивающий объективную регистрацию оculo-моторной активности (фиксации, саккады, диаметр зрачка) и позволяющий проводить детальный анализ процессов зрительного внимания и стратегий сканирования визуальной информации в экспериментальных парадигмах, направленных на изучение механизмов рабочей памяти. Фундаментальные теоретические основы и практические рекомендации по применению айтрекинга в научных исследованиях систематизированы в работе К. Холмквиста с коллегами [65], которая служит методологическим руководством для ученых, использующих данную технологию в экспериментальной практике. Т. Ван Гог и К. Шейтер обнаружили, что увеличение диаметра зрачка коррелирует с субъективными оценками когнитивной нагрузки при изучении мультимедийных материалов [66]. Совместное применение айтрекинга и пупиллометрии позволяет комплексно оценивать когнитивную нагрузку и зрительное внимание в интерактивных задачах. В его основу положено пять или не больше пяти мест.

Электродермальная активность (ЭДА) служит маркером симпатической активации, связанной с эмоциональным возбуждением и умственным усилием. В соответствии с нейроэнергетической моделью А. Ф. Сандерса повышение ЭДА отражает физиологическую стоимость когнитивной нагрузки. К. Боушеин показал, что увеличение уровня проводимости кожи и частоты спонтанных флуктуаций коррелирует с субъективными оценками когнитивной нагрузки [67]. В исследовании Ф. Чен с соавторами была продемонстрирована чувствительность ЭДА к изменениям сложности когнитивных задач [68].

Электроэнцефалография (ЭЭГ) и магнитоэнцефалография (МЭГ) обеспечивают высокую временную разрешающую способность регистрации нейроэлектрической активности, позволяя анализировать частотные компоненты, связанные с когнитивной нагрузкой. П. Антоненко и коллеги использовали ЭЭГ для валидации субъективных оценок когнитивной нагрузки при изучении гипермедиа [69]. Исследование А. Гевинса и М. Е. Смита продемонстрировало, что увеличение мощности в тета-диапазоне (4–8 Гц) во фронтальных областях коррелирует с увеличением нагрузки на рабочую память и отражает мобилизацию механизма усилия, что согласуется с моделью А. Д. Бэддели и нейроэнергетической моделью А. Ф. Сандерса [70]. В. Климеч доказал, что подавление альфа-ритма (8–12 Гц) в теменных и затылочных областях ассоциируется с активной когнитивной

обработкой и селективным вниманием [71]. О. Йенсен и К. Д. Теше с помощью МЭГ обнаружили снижение фронтальной тета-активности после периода удержания информации, подтверждая функциональную роль тета-осцилляций в рабочей памяти [72]. В другом исследовании, проведенном Ф. Ценгом и др., применялась комбинация электроэнцефалографии и *универсальной транскраниальной электро-стимуляции* (ТЭС). Ученые пришли к выводу: фазовая разница в гамма-осцилляциях (40 Гц) между левой височной и теменной областями играет критическую роль в связывании визуальной информации в рабочей памяти, что расширяет понимание нейронных механизмов когнитивной нагрузки [73]. Исследование К. Д. Уикенса и коллег продемонстрировало применение P300 для анализа ресурсных требований сложной перцептивно-моторной задачи. Компонент P300 вызванных потенциалов, связанный с распределением ресурсов внимания и обновлением рабочей памяти, широко используется как индикатор остаточной емкости когнитивных ресурсов. В экспериментальной парадигме участники выполняли основную задачу слежения различной сложности одновременно с вторичной задачей обнаружения редких слуховых стимулов. Амплитуда P300 на стимулы вторичной задачи систематически уменьшалась по мере увеличения сложности основной задачи, что интерпретировалось как перераспределение ресурсов от вторичной к основной задаче [74]. Данные результаты согласуются с предсказаниями теории множественных ресурсов относительно ограниченности и конкуренции за перцептивно-когнитивные ресурсы.

Современной тенденцией в исследованиях когнитивной нагрузки является разработка мультимодальных подходов, объединяющих несколько объективных физиологических показателей для формирования интегрированного индекса когнитивной нагрузки. Такой комплексный метод позволяет минимизировать влияние субъективных факторов и дает более полную оценку функционального состояния центральной нервной системы. Например, работа М. Ахмади и соавторов подтверждает, что одновременная регистрация реакций (реакция зрачка, частота сердечных сокращений, кожно-гальваническая реакция, электроэнцефалография) при выполнении задач разной сложности обеспечивает высокую чувствительность и специфичность в дифференциации уровней когнитивной нагрузки [75].

Таким образом, интеграция объективных физиологических методов с ведущими теоретическими моделями когнитивной нагрузки обеспечивает глубокое понимание нейрофизиологических и когнитивных механизмов умственного усилия, а применение

мультимодальных комплексов объективных показателей представляет собой перспективное направление, соответствующее актуальным задачам когнитивной науки. Эти методы не только количественно отражают уровень когнитивной нагрузки, но и выявляют специфические нейронные корреляты, что имеет важное значение для оптимизации образовательных и профессиональных практик.

Мультимодальные методы

Современные исследования все чаще используют мультимодальный подход, объединяющий субъективные, поведенческие и физиологические методы измерения когнитивной нагрузки, что позволяет повысить точность и валидность оценки, а также учесть многогранность когнитивных процессов. Мультимодальные методы базируются на одновременном сборе и анализе данных из нескольких источников – *физиологических* (например, электрокардиограмма (ЭКГ), электроэнцефалограмма, кожно-гальваническая реакция (КГР), частота сердечных сокращений, движение глаз), *поведенческих* (время реакции, ошибки, движение курсора, жесты, речь) и *субъективных* (шкалы самооценки, такие как шкала Ф. Пааса).

Растущее число эмпирических работ подтверждает потенциал мультимодального подхода. В исследовании Ф. Пасса и коллег была предложена интегративная модель измерения когнитивной нагрузки, включающая различные объективные и субъективные показатели. Применение статистических методов для анализа мультимодальных данных позволило достичь более точной оценки уровня когнитивной нагрузки по сравнению с любым отдельным методом [16]. Дж. Свеллер подчеркнул важность комбинированного подхода к измерению когнитивной нагрузки для обеспечения надежности и валидности получаемых данных в образовательных исследованиях [76].

Ранние исследования, например работа Р. Брюнкена и его коллег, убедительно продемонстрировали его валидность в образовательном контексте. Авторы сочетали субъективные оценки по шкале умственных усилий, время реакции во вторичной задаче и данные ЭЭГ. Факторный анализ показал наличие единого латентного фактора когнитивной нагрузки, который объяснял 68 % общей дисперсии всех трех типов измерений, что стало весомым аргументом в пользу конвергентной валидности мультимодальной оценки [77]. Аналогично, Г. Корбалан и соавторы предложили интегрированную модель эффективности обучения, объединившую субъективные оценки и объективные показатели производительности, что позволило получить более точные предикторы учебных достижений [78].

В области человеко-компьютерного взаимодействия и обработки естественного языка мультимодальные методы позволяют оценить когнитивную нагрузку в сложных, динамичных задачах. Так, в исследовании постредактирования машинного перевода Н. Хербиг с соавторами разработали модель, использующую широкий спектр данных: *физиологические* (показатели движений глаз, кожно-гальваническая реакция, сердечный ритм), *поведенческие* (время редактирования) и *текстовые характеристики* [79]. Было показано, что мультимодальная модель значительно превосходит любую мономодальную в предсказании субъективно воспринимаемой когнитивной нагрузки. Комбинация данных отслеживания взгляда, состояния кожи и сердечного ритма оказалась наиболее прогностичной, демонстрируя, как синергия слабо и умеренно коррелирующих признаков из разных модальностей создает надежный измерительный инструмент.

Исследования взаимодействия человека с мультимодальными интерфейсами также подтверждают этот тезис. В работе Н. Руиз изучалась когнитивная нагрузка при выполнении пространственных задач с использованием интерфейса, поддерживающего речь и жесты. Было установлено, что при низкой нагрузке пользователи демонстрируют семантическую избыточность (дублирование информации в разных модальностях), тогда как при высокой нагрузке возрастает семантическая комплементарность (распределение уникальной информации по модальностям) [80]. Этот сдвиг в поведении является поведенческим маркером когнитивной нагрузки и отражает стратегию оптимизации использования ресурсов рабочей памяти, что согласуется с теорией множественных ресурсов К. Д. Уикенса. Ф. Чен и соавторы также показали, что высокая когнитивная нагрузка изменяет поведение пользователя по целому ряду модальностей: меняются просодические характеристики речи, паттерны жестов и динамика ввода данных с помощью цифрового пера. Проект RMCLM (Robust multimodal cognitive load measurement) был направлен на интеграцию данных ЭЭГ, окулографии и лингвистических характеристик для создания надежной системы измерения в реальном времени [81].

Особое значение мультимодальная оценка когнитивной нагрузки имеет в критически важных для безопасности областях, таких как управление транспортными средствами и авиакосмической области. М. П. Оппельт с коллегами создали обширный мультимодальный набор данных ADABase для оценки когнитивной нагрузки водителей в условиях симуляции полуавтономного вождения. У 51 испытуемого, выполнявшего задачи N-back и K-drive, непрерывно регистрировался широкий спектр сигналов: ЭКГ, ЭДА, электромиография (ЭМГ),

фотоплетизмография (ФПГ), частота дыхания, температура кожи, данные айтрекера, а также поведенческие данные (анализ лицевых экспрессий) и показатели производительности. Обученные на этих данных алгоритмы машинного обучения смогли с высокой точностью классифицировать уровни нагрузки, причем модели, использующие данные из нескольких модальностей, показали значительно лучшие результаты, чем модели на основе одного источника данных. Это исследование является ярким примером того, как мультимодальный подход, основанный на физиологических и поведенческих измерениях, позволяет создавать системы мониторинга состояния водителя для повышения безопасности дорожного движения [82].

Даже в такой специфической области, как социологические опросы, мультимодальный подход находит свое применение. В пилотном квазиэксперименте И. Ф. Девятко исследовалась когнитивная нагрузка интервьюеров при переходе с бумажных анкет (PAPI) на компьютерные (CAPI). Параллельное использование субъективной шкалы Ф. Пааса, физиологического индикатора (частота сердечных сокращений) и данных видеозаписи с экрана планшета позволило комплексно оценить умственные усилия, связанные с освоением новой технологии. Были продемонстрированы как преимущества, так и технические ограничения такого подхода, что подчеркивает важность дальнейшей методической работы в этом направлении [83].

Несмотря на значительные достижения, теория когнитивной нагрузки сталкивается с рядом методологических и концептуальных вызовов. В современных условиях, где стремительное развитие цифровых инструментов и их внедрение в образовательную практику трансформирует обучение в непрерывно эволюционирующий процесс на протяжении всей жизни [84], одной из основных проблем остается сложность дифференцированного измерения трех типов когнитивной нагрузки: внутренней, внешней и релевантной. Т. де Йонг в своем критическом анализе отмечает, что большинство методов измерения оценивают общую когнитивную нагрузку, не позволяя разделить ее компоненты [85]. Данное ограничение особенно актуально в перцептивно насыщенных средах (таких как VR / AR), где, по мнению А. Скулмовского, точная оценка требует тщательного анализа специфики поставленной задачи. При этом автор указывает, что адекватные результаты оценки отдельных составляющих когнитивной нагрузки в подобных условиях могут быть получены как с помощью адаптированных субъективных методов (включая краткие шкалы), так и посредством объективных психофизиологических методов или их мультимодальной интеграции [86].

Именно мультимодальные методы измерения когнитивной нагрузки представляют собой эффективный и перспективный инструмент, позволяющий интегрировать данные из различных источников и получить более полное представление о когнитивных процессах и структуре когнитивной нагрузки. Их применение в рамках разных теоретических парадигм, от ресурсной модели внимания до расширенной теории когнитивной нагрузки, подтверждает универсальность и адаптивность данного подхода. В будущем дальнейшее развитие мультимодальных технологий и методов анализа, включая машинное обучение и искусственный интеллект, позволит повысить точность и оперативность оценки когнитивной нагрузки в реальных условиях, что имеет важное значение для образования, промышленности, медицины и других областей.

Несмотря на существенные достижения в области когнитивной психологии, сохраняется ряд нерешенных методологических проблем, требующих дальнейшего научного осмысления. Главной проблемой является отсутствие единой методологической базы и стандартизированной классификации методов измерения когнитивной нагрузки, что затрудняет сопоставимость результатов различных исследований и выбор оптимальных инструментов для конкретных задач. Кроме того, дифференцированное измерение внутренних, внешних и релевантных компонентов когнитивной нагрузки по-прежнему представляет собой сложную задачу, требующую разработки новых методик и аналитических моделей. Важным направлением дальнейших исследований является также интеграция когнитивных и аффективных параметров, учитывающая влияние мотивации, стресса и эмоционального состояния на восприятие и распределение когнитивных ресурсов.

Попытка систематизации теоретических подходов и методов измерения когнитивной нагрузки (табл.), представленная в данном обзоре, создает основу для развития целостной методологической рамки, способствующей преодолению фрагментарности исследовательского поля и обеспечивающей более обоснованный выбор инструментов в будущих эмпирических и прикладных исследованиях.

Заключение

В результате систематического обзора литературы были выделены ключевые теоретические школы и концептуальные подходы к пониманию когнитивной нагрузки: ресурсная модель внимания (Д. Канеман), модель рабочей памяти (А. Д. Бэддели и Г. Дж. Хитч), нейроэнергетическая модель (А. Ф. Сандерс), теория множественных ресурсов (К. Д. Уикенс), теория когнитивной нагрузки (Дж. Свеллер), расширенная теория

когнитивной нагрузки (Ф. Паас и др.). Исследование подтверждает, что когнитивная нагрузка является многомерным и комплексным феноменом, который рассматривается с точки зрения нескольких подходов и не может быть адекватно оценен с помощью единственного метода.

Существующие в научной литературе эмпирические методы измерения когнитивной нагрузки были разделены на четыре группы: субъективные, объективные поведенческие, психофизиологические и мультимодальные методы. Данные методы дополняют друг друга, отражая различные аспекты умственного усилия и ограничения когнитивных ресурсов. Субъективные шкалы, такие как NASA-TLX, шкала Ф. Пааса и др., остаются популярными благодаря своей простоте и валидности, однако их рефлексивная природа и зависимость от самовосприятия испытуемого накладывают ограничения на точность и объективность данных. Объективные поведенческие методы, включая анализ времени реакции, количество ошибок, метод двойной задачи и др., позволяют выявить влияние когнитивной нагрузки на производительность, но зачастую они не дают прямого доступа к нейрофизиологическим механизмам. Психофизиологические методы, такие как пупиллометрия, вариабельность сердечного ритма, электроэнцефалография, электродермальная активность и др., обеспечивают непрерывный и неинвазивный мониторинг когнитивной нагрузки в реальном времени, раскрывая нейронные и автономные корреляты умственного усилия. Их интеграция с теоретическими моделями, такими как многокомпонентная модель рабочей памяти А. Д. Бэддели и нейроэнергетическая модель А. Ф. Сандерса, позволяет более глубоко понять механизмы возникновения перегрузки и компенсаторных процессов. Мультимодальные подходы, объединяющие несколько источников данных, демонстрируют наибольшую перспективность для комплексной и точной оценки когнитивной нагрузки, повышая точность и надежность оценки.

Основной вклад работы состоял в создании интегративной методологической рамки (см. табл.), которая связывает теоретические модели когнитивной нагрузки с соответствующими методами ее измерения. Это способствует систематизации и унификации подходов, что важно для повышения качества и сопоставимости исследований в различных областях.

В перспективе дальнейшее развитие мультимодальных методов, а также внедрение методов машинного обучения и искусственного интеллекта могут привести к существенному улучшению точности, оперативности и адаптивности оценки когнитивной нагрузки в реальных условиях. Это имеет важное значение для оптимизации учебных процессов, повышения безопасности и эффективности

Табл. Применимость методов измерения когнитивной нагрузки в разных концептуальных моделях
Tab. Cognitive load measurement methods in different conceptual models

Концепция / Методы	Субъективные	Объективные поведенческие	Объективные психофизиологические	Мультимодальные
Ресурсная модель внимания (Д. Канеман)	++ (особенно RSME, NASA-TLX)	+++ (особенно метод двойной задачи, анализ производительности)	++ (BCP, пупиллометрия, ЭДА как индикаторы общего усилия)	++
Модель рабочей памяти (А. Д. Бэддели и Г. Дж. Хитч)	+ (все шкалы применимы для оценки нагрузки на центральный исполнитель)	+++ (особенно N-назад, анализ паттернов ошибок, метод двойной задачи для специфических компонентов)	++ (ЭЭГ / МЭГ для локализации активности, айтрекинг для визуально-пространственного блокнота)	++
Нейроэнергетическая модель (А. Ф. Сандерс)	++ (особенно RSME как мера «усилия», NASA-TLX)	++ (особенно анализ времени реакции для оценки стадий обработки)	+++ (все методы, т.к. модель напрямую связывает когниции и физиологию: BCP, ЭЭГ, ЭДА, пупиллометрия)	+++
Теория множественных ресурсов (К. Д. Уикенс)	+++ (особенно NASA-TLX, профиль рабочей нагрузки (WP), которые имеют субшкалы, SWAT)	+++ (особенно метод двойной задачи для проверки интерференции между ресурсами)	++ (айтрекинг для разделения визуальных / слуховых модальностей, ЭЭГ для кодов обработки)	++
Теория когнитивной нагрузки (Дж. Свеллер)	+++ (особенно шкала Ф. Пааса, методики Ф. Пааса и Й. ван Мерриенбура, NASA-TLX)	+++ (особенно анализ производительности в задачах на обучение и трансфер знаний, анализ стратегий решения)	++ (айтрекинг для анализа взаимодействия с учебным материалом, пупиллометрия для измерения усилия)	+++
Расширенная теория когнитивной нагрузки (Ф. Паас и др.)	+++ (все шкалы нагрузки + обязательное добавление шкал для измерения аффекта: мотивации, тревожности, эмоций)	++ (анализ производительности деятельности, интерпретируемый в связке с аффектом)	+++ (BCP, ЭДА, ЭЭГ как индикаторы не только когнитивного, но и аффективного состояния)	+++ (является основной методологией для этой рамки)

Прим.: +++ (Ключевой метод / Наиболее релевантен): метод является центральным для данной теории, часто был разработан в ее рамках или идеально подходит для проверки ее основных положений; ++ (Часто используется / Высокая релевантность): метод широко и успешно применяется в исследованиях, основанных на данной теории; + (Применим / Умеренная релевантность): метод может использоваться, но не является специфичным или основным для данной теории, измеряет общие аспекты нагрузки.

профессиональной деятельности, а также для разработки адаптивных цифровых систем, способных динамически подстраиваться под когнитивные возможности пользователя.

Таким образом, практическая значимость исследования заключается в создании научно обоснованной классификации инструментария для оценки когнитивной нагрузки. Разработанная интегративная методологическая рамка позволяет ученым и практикам обоснованно выбирать наиболее подходящие методы измерения когнитивной нагрузки в зависимости от специфики задач, контекста исследования и доступных ресурсов. Результаты обзора служат фундаментом для будущих междисциплинарных исследований и практических разработок, направленных на оптимизацию когнитивных ресурсов и повышение эффективности человеческой деятельности в условиях растущей информационной нагрузки.

Однако проведенный систематический обзор имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации его результатов. Несмотря на включение русскоязычной базы данных eLIBRARY.RU, основной корпус проанализированных публикаций был англоязычным. Это может привести к некоторому смещению в сторону исследований, опубликованных на английском языке, и потенциальному упущению релевантных работ на других языках.

Конфликт интересов: Авторы заявили об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

Conflict of interests: The authors declared no potential conflict of interests regarding the research, authorship, and / or publication of this article.

Критерии авторства: Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Contribution: All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for the information published in this article.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Благотворительного фонда «Вклад в будущее», договор целевого поступления – пожертвования № КИП-05/25 от 20.04.2025.

Funding: This work was supported by the Charitable Foundation of Contribution to the Future (targeted donation agreement no. KIP-05/25, April 20, 2025).

Литература / References

1. Kirschner P. A. Cognitive load theory: Implications of cognitive load theory on the design of learning. *Learning and Instruction*, 2002, 12(1): 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(01\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00014-7)
2. Miller G. A. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 1956, 63(2): 81–97.
3. Kahneman D. *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973, 212.
4. Baddeley A. D., Hitch G. J. Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 1974, 8: 47–89. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
5. Baddeley A. D. The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 2000, 4(11): 417–423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
6. Baddeley A. D. *Working memory, thought, and action*. Oxford: Oxford University Press, 2007, 412. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198528012.001.0001>
7. Sanders A. F. Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 1983, 53(1): 61–97. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90016-1)
8. Wickens C. D. *Processing resources in attention, dual task performance, and workload assessment*. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1981, 45.
9. Wickens C. D. Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 2008, 50(3): 449–455. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
10. Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 1988, 12(2): 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
11. Sweller J., Van Merriënboer J. J. G., Paas F. G. W. C. Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 1998, 10(3): 251–296. <https://doi.org/10.1023/a:1022193728205>
12. Sweller J. Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, 2010, 22(2): 123–138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
13. Paas F., Ayres P., Pachman M. Assessment of cognitive load in multimedia learning: Theory, methods and applications. *Recent innovations in educational technology that facilitate student learning*, eds. Robinson D. H., Schraw G. Charlotte: Information Age Publishing, 2008, 11–35. URL: https://www.researchgate.net/publication/301806857_Assessment_of_Cognitive_Load_in_multimedia_Learning_theory_methods_and_Applications (accessed 12 Jul 2025).
14. Plass J. L., Pawar S. Toward a taxonomy of adaptivity for learning. *Journal of Research on Technology in Education*, 2020, 52(3): 275–300. <https://doi.org/10.1080/15391523.2020.1719943>
15. Sweller J. CHARTER TWO – Cognitive load theory. *Psychology of Learning and Motivation*, 2011, 55: 37–76. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>
16. Paas F., Tuovinen J. E., Tabbers H., Van Gerven P. W. M. Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational Psychologist*, 2003, 38(1): 63–71. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8
17. Baddeley A. D. Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 2012, 63: 1–29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
18. Antonenko P., Paas F., Grabner R., Van Gog T. Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educational Psychology Review*, 2010, 22(4): 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>
19. Moreno R. Cognitive load theory: More food for thought. *Instructional Science*, 2010, 38(2): 135–141. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9122-9>
20. Paas F. Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 1992, 84(4): 429–434. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.429>
21. Paas F., Van Merriënboer J. J. G. Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 1994, 86(1): 122–133. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.86.1.122>

22. Paas F., Van Merriënboer J. J. G. Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks. *Educational Psychology Review*, 1994, 6(4): 351–371. <https://doi.org/10.1007/BF02213420>
23. Hart S. G., Staveland L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Human Mental Workload*, 1988, 52: 139–183. [https://doi.org/10.1016/s0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/s0166-4115(08)62386-9)
24. Chandler P., Sweller J. Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 1991, 8(4): 293–332. https://doi.org/10.1207/s1532690xc0804_2
25. De Winter J. C. F., Happee R., Martens M. H., Stanton N. A. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27(B): 196–217. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.06.016>
26. Hart S. G., Hauser J. R. Inflight application of three pilot workload measurement techniques. *Aviation, space, and environmental medicine*, 1987, 58(5): 402–410. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3593142/> (accessed 10 Jul 2025).
27. Zijlstra F. R. H. *Efficiency in work behaviour: A design approach for modern tools*. Delft: Delft University Press, 1993, 256.
28. Kahneman D. *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973, 212.
29. Reid G. B., Nygren T. E. The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. *Advances in Psychology*, 1988, 52: 185–218. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62387-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62387-0)
30. Tsang P. S., Velazquez V. L. Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*, 1996, 39(3): 358–381. <https://doi.org/10.1080/00140139608964470>
31. Rubio S., Díaz E., Martín J., Puente J. M. Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods. *Applied Psychology*, 2004, 53(1): 61–86. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>
32. Koriat A., Levy-Sadot R. Conscious and unconscious metacognition: A rejoinder. *Consciousness and Cognition*, 2000, 9(2): 193–202. <https://doi.org/10.1006/ccog.2000.0436>
33. Lee J. D., Gordon-Becker S., Liu Y., Wickens C. D. *An introduction to human factors engineering*. New York: Pearson Prentice Hall, 2004, 587.
34. Barrouillet P., Camos V. The time-based resource-sharing model of working memory. *Working memory: State of the science*, eds. Logie R. H., Camos V., Cowan N. Oxford: Oxford University Press, 2021, 85–115. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198842286.003.0004>
35. Sweller J., Cooper G. A. The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition and Instruction*, 1985, 2(1): 59–89. https://doi.org/10.1207/s1532690xc0201_3
36. Sternberg S. Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. *American Scientist*, 1969, 57(4): 421–457.
37. Hockey G. R. J. Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 1997, 45(1-3): 73–93. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(96)05223-4)
38. Brookhuis K. A., De Waard D. Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(3): 898–903. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.001>
39. Meyer D. E., Kieras D. E. A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychological Review*, 1997, 104(1): 3–65. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.104.1.3>
40. Norman D. A., Bobrow D. G. On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 1975, 7(1): 44–64. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90004-3)
41. Logie R. H. Visuo-spatial working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1986, 38(2): 229–247. <https://doi.org/10.1080/14640748608401596>
42. De Waard D. *The measurement of drivers' mental workload*. Groningen: University of Groningen, 1996, 260.
43. Kramer A. F., Larish J. F., Strayer D. L. Training for attentional control in dual task settings: A comparison of young and old adults. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1995, 1(1): 50–76. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.1.1.50>
44. Wickens C. D. Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2002, 3(2): 159–177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
45. Brünken R., Steinbacher S., Plass J. L., Leutner D. Assessment of cognitive load in multimedia learning using dual-task methodology. *Experimental Psychology*, 2002, 49(2): 109–119. <https://doi.org/10.1027//1618-3169.49.2.109>
46. Conrad R., Hull A. J. Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, 1964, 55(4): 429–432. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1964.tb00928.x>

47. Reason J. *Human error*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 320. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>
48. Matthews G., Campbell S. E., Falconer S., Joyner L., Huggins J., Gilliland K., Grier T., Warm J. S. Fundamental dimensions of subjective state in performance settings: Task engagement, distress and worry. *Emotion*, 2002, 2(4): 315–340. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.2.4.315>
49. Jaeggi S. M., Buschkuhl M., Jonides J., Perrig W. J. Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2008, 105(19): 6829–6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
50. Owen A. M., McMillan K. M., Laird A. R., Bullmore E. N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 2005, 25(1): 46–59. <https://doi.org/10.1002/hbm.20131>
51. Shah P., Miyake A. The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: An individual differences approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1996, 125(1): 4–27. <https://doi.org/10.1037//0096-3445.125.1.4>
52. Ericsson K. A., Simon H. A. *Protocol analysis: Verbal reports as data*. Cambridge, MA: MIT Press, 1993, 453.
53. Mulder G. The concept and measurement of mental effort. *Human mental workload*, eds. Hancock P. A., Meshkati N. Amsterdam: North-Holland, 1986, 175–214.
54. Jorna P. G. A. M. Heart rate and workload variations in actual and simulated flight. *Ergonomics*, 1993, 36(9): 1043–1054. <https://doi.org/10.1080/00140139308967976>
55. Hjortskov N., Rissen D., Blangsted A. K., Fallentin N., Lundberg U., Søgaard K. The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, 92(1-2): 84–89. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1055-z>
56. Thayer J. F., Lane R. D. A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *Journal of Affective Disorders*, 2000, 61(3): 201–216. [https://doi.org/10.1016/s0165-0327\(00\)00338-4](https://doi.org/10.1016/s0165-0327(00)00338-4)
57. Castaldo R., Melillo P., Bracale U., Caserta M., Triassi M., Pecchia L. Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, 18: 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.012>
58. Forte G., Favieri F., Casagrande M. Heart rate variability and cognitive function: A systematic review. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00710>
59. Kahneman D., Beatty J. Pupil diameter and load on memory. *Science*, 1966, 154(3756): 1583–1585. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1583>
60. Beatty J. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 1982, 91(2): 276–292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
61. Klingner J., Kumar R., Hanrahan P. Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. *ETRA '08: Eye tracking research and applications: Proc. Conf.*, Savannah, Georgia, 26–28 Mar 2008. NY: Association for Computing Machinery, 2008, 69–72. <https://doi.org/10.1145/1344471.1344489>
62. Unsworth N., Robison M. K. Working memory capacity and sustained attention: A cognitive-energetic perspective. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2019, 46(1): 77–103. <https://doi.org/10.1037/xlm0000712>
63. Recarte M. A., Nunes L. M. Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2003, 9(2): 119–137. <https://doi.org/10.1037/1076-898x.9.2.119>
64. Rodemer M., Karch J., Bernholt S. Pupil dilation as cognitive load measure in instructional videos on complex chemical representations. *Frontiers in Education*, 2023, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1062053>
65. Holmqvist K., Nyström N., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H., Van de Weijer J. *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press, 2011, 560.
66. Van Gog T., Scheiter K. Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, 2010, 20(2): 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.009>
67. Boucsein W. *Electrodermal activity*. 2nd ed. NY: Springer, 2013, 635. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0>
68. Chen F., Ruiz N., Choi E., Epps J., Khawaja M. A., Taib R., Yin B., Wang Y. Multimodal behavior and interaction as indicators of cognitive load. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 2013, 2(4): 1–36. <https://doi.org/10.1145/2395123.2395127>
69. Antonenko P., Paas F., Grabner R. H., Van Gog T. Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educational Psychology Review*, 2010, 22(4): 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>

70. Gevins A., Smith M. E. Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. *Cerebral Cortex*, 2000, 10(9): 829–839. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.9.829>
71. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 1999, 29(2-3): 169–195. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00056-3)
72. Jensen O., Tesche C. D. Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, 2002, 15(8): 1395–1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
73. Tseng P., Chang Y.-T., Chang C.-F., Liang W.-K., Juan C.-H. The critical role of phase difference in gamma oscillation within the temporoparietal network for binding visual working memory. *Scientific Reports*, 2016, 6. <https://doi.org/10.1038/srep32138>
74. Wickens C., Kramer A., Vanasse L., Donchin E. Performance of concurrent tasks: A psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, 1983, 221(4615): 1080–1082. <https://doi.org/10.1126/science.6879207>
75. Ahmadi M., Michalka S. W., Ahmadi Najafabadi M., Wünsche B. C., Billinghamurst M. EEG, pupil dilations, and other physiological measures of working memory load in the sternberg task. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2024, 8(4). <https://doi.org/10.3390/mti8040034>
76. Sweller J. Measuring cognitive load. *Perspectives on Medical Education*, 2018, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s40037-017-0395-4>
77. Brünken R., Steinbacher S., Plass J. L., Leutner D. Assessment of cognitive load in multimedia learning using dual-task methodology. *Experimental Psychology*, 2002, 49(2): 109–119. <https://doi.org/10.1027//1618-3169.49.2.109>
78. Corbalan G., Kester L., Van Merriënboer J. J. G. Towards a personalized task selection model with shared instructional control. *Instructional Science*, 2006, 34(5): 399–422. <https://doi.org/10.1007/s11251-005-5774-2>
79. Herbig N., Pal S., Vela M., Krüger A., Van Genabith J. Multi-modal indicators for estimating perceived cognitive load in post-editing of machine translation. *Machine Translation*, 2019, 33(3): 91–115. <https://doi.org/10.1007/s10590-019-09227-8>
80. Ruiz N. *Cognitive load measurement in multimodal interfaces*. Sydney: University of New South Wales, 2011, 169. <https://doi.org/10.26190/unsworks/23501>
81. Chen F., Zhou J., Wang Y., Yu K., Arshad S. Z., Khawaji A., Conway D. *Robust multimodal cognitive load measurement*. Springer, 2016, 254. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31700-7>
82. Oppelt M. P., Foltyn A., Deuschel J., Lang N. R., Hokzer N., Eskofier B. M., Yang S. H. ADABase: A multimodal dataset for cognitive load estimation. *Sensors*, 2022, 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010340>
83. Девятко И. Ф. Разработка подхода к количественной мультимодальной оценке когнитивной нагрузки интервьюеров: результаты пилотного квазиэксперимента. *Вестник РУДН. Серия: Социология*. 2018. Т. 18. № 4. С. 627–637. [Deviatko I. F. Developing an approach to multimodal quantitative assessment of interviewers' cognitive load: First results of a field quasi experiment. *RUDN Journal of Sociology*, 2018, 18(4): 627–637. (In Russ.)] <https://doi.org/10.22363/2313-2272-2018-18-4-627-637>
84. Fidalgo P., Thormann J. The future of lifelong learning: The role of artificial intelligence and distance education. *Lifelong Learning – Education for the Future World*, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114120>
85. De Jong T. Cognitive load theory, educational research, and instructional design: Some food for thought. *Instructional Science*, 2010, 38(2): 105–134. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9110-0>
86. Skulmowski A. Guidelines for choosing cognitive load measures in perceptually rich environments. *Mind, Brain, and Education*, 2023, 17(1): 20–28. <https://doi.org/10.1111/mbe.12342>