

Решение когнитивных задач в электронной среде обучения: влияние визуальной неопределенности

Cognitive problems solving in the electronic learning environment: the influence of visual uncertainty

doi 10.26310/2071-3010.2021.274.8.010



Е. Е. Котова,

к. т. н., доцент, кафедра автоматизации и процессов управления (АПУ), факультет компьютерных технологий и информатики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)/кафедра клинической психологии, факультет клинической психологии, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
✉ eekotova@gmail.com

E. E. Kotova,

PhD of engineering sciences, associate professor, Saint-Petersburg electrotechnical university «LETI»/Saint-Petersburg state pediatric medical university

Процесс проектирования учебного контента, ведущего к активному вовлечению студентов и развитию помимо профессиональных компетенций когнитивных навыков — это вызов для разработчиков современной инновационной образовательной среды.

Перенос интеллектуальных действий в компьютерную среду непосредственно затрагивает вопрос когнитивной нагрузки, когнитивных ресурсов человека. В частности, в процессе обучения, требуется исследование множества факторов, влияющих на познавательную нагрузку, особенно в мультимедийной среде, где учебные ситуации и информация предоставляются студенту более чем в одном режиме.

Различные виды профессиональной деятельности включают информационные ресурсы, в которых присутствует неопределенность, среди которых необходимо принимать решения, важные для производительности. В исследованиях ставятся вопросы, могут ли люди надлежащим образом приспособиться к источникам неопределенности во время принятия решений. Здесь важно учитывать, что неопределенность возникает не только из внешнего мира, но и из-за внутреннего состояния человека, что составляет определенные типы когнитивной нагрузки.

В электронной среде обучения ввиду переизбытка информационных ресурсов, постоянных технических инноваций и внедрения новых продуктов, требуется использование различных инструментов оценки продуктивности учебной деятельности с целью сбора актуальной, функциональной академической информации, на основе которой можно проанализировать потенциальные возможности обучающихся по восприятию информации и продуктивности интеллектуальной деятельности.

Основная цель статьи — эффективное представление учебного контента, в частности с наличием визуальной неопределенности, и адаптация когнитивной нагрузки с учетом стилей обучающихся.

В статье предложен метод автоматизированного интеллектуального анализа индивидуальных характеристик решения когнитивных задач учащимися, а именно точности принятия решений (accuracy, A) и времени реакции (reaction time, RT) в условиях наличия визуальной неопределенности представления информации с применением нового подхода к измерению когнитивной нагрузки визуального учебного контента на примерах решения когнитивных задач с наличием неопределенности стимулов.

Метод обеспечивает выполнение следующих функций: интеллектуальный анализ данных диагностирования когнитивного потенциала обучающихся; формирование и оценку производительности решения сложных задач; оценку когнитивной нагрузки учебных задач; прогнозирование и визуализацию данных.

Статья организована следующим образом. Во введении кратко рассматриваются направления исследований. В первом разделе рассматриваются исследования У. Хика, Р. Хаймана, П. Фиттса, являющиеся основой подхода к измерению когнитивной нагрузки. Во втором разделе изложены общие принципы теории когнитивной нагрузки, основные типы когнитивной нагрузки в контексте образовательной практики. В третьем разделе представлен метод оценки производительности решения серии задач выбора со сложной моделью стимулов. Представлена компьютерная версия методики диагностирования когнитивных параметров модели обучающихся. В четвертом разделе рассматривается алгоритмический подход к измерению количества информационной энтропии. В пятом разделе представлены исследования, которые привели к получению результатов. В заключительном разделе обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

The educational content designing process leading to the active cognitive skills development is a challenge for developers of a modern innovative educational environment.

Transfer of intellectual actions to the computer environment raises the issue of cognitive load. In the learning process, it is required to investigate the factors influencing the cognitive load. There is uncertainty in the multimedia environment due to the overabundance of information resources. Uncertainty arises not only from the external world, but also due to the internal state of a person, which constitutes certain types of cognitive load.

The main goal of this paper is the effective presentation of educational content, in particular with the presence of visual uncertainty, and the adaptation of cognitive load, taking into account the students styles.

This paper have proposed a method of automated intellectual analysis of individual characteristics of solving cognitive tasks by students in the presence of visual uncertainty in the information presentation using a new approach to measuring cognitive load.

This method provides the following functions: diagnosing the students cognitive potential based on cognitive style; formation and assessment of the complex problems solving performance; assessment of the educational tasks cognitive load based on an algorithmic approach to measuring the amount of information entropy; forecasting and data visualization.

Ключевые слова: образовательная среда, когнитивная нагрузка, визуальная неопределенность информации, время реакции, принятие решений.

Keywords: educational environment, cognitive load, visual information uncertainty, reaction time, decision making.

Введение

Стратегии выбора или принятия решения из нескольких альтернативных вариантов применяются во многих областях профессиональной деятельности человека, в том числе в автоматизированных системах научных исследований, системах производ-

ленной автоматизации, робототехники, дистанционного управления и др. Взаимодействие человека и компьютера (Human Computer Interaction, HCI) в человеко-машинных системах (Human Machine System, HMS) состоит из серии стимулов и реакций (Stimuli-Reaction, SR). Важнейшей задачей в профессиональной деятельности является необхо-

димось принятия решений или выбора из нескольких альтернатив. В учебной деятельности, которая все больше погружает учащихся в электронную среду (системы дистанционного обучения, электронные курсы и учебники, открытые учебные ресурсы и др.) стратегии выбора играют также значительную роль при работе с информацией, в ситуациях тестирования и решении различных практических задач.

Как отмечается в публикациях, со второй половины XX века исследователи стали интересоваться взаимосвязи между умственной скоростью и показателями интеллекта, которые включали изучение различий в скорости обработки данных, таких, как «времени реакции», «времени отклика», «умственной скорости», «скорости обработки», «скорости извлечения из долговременной памяти», «хронометрической способности», «времени проверки» и других мер [1, 2].

Основными показателями продуктивности деятельности (производительности) человека при выполнении серии задач выбора решений/ответов из нескольких альтернативных вариантов являются среднее (или медианное) время реакции (обозначаемое в литературе Reaction Time, RT; простая аббревиатура RT обычно означает RTmd, относящаяся к медиане) и точность принятия решений (ассурага, A), или среднее число ошибок, вероятность правильного ответа и риска возникновения ошибок.

За последние десятилетия в исследованиях индивидуальных различий в скорости обработки информации получены многочисленные подтверждения наличия связи между скоростью обработки информации в элементарных когнитивных задачах (Elementary Cognitive Task, ECT) и персональными перцептивно-когнитивными способностями ([3, 4] и др.), что более глубоко характеризует мыслительно-познавательные процессы в структуре интеллектуальной деятельности. В частности, в публикациях показано, что эффективность обработки информации включает в себя скорость, однако, что вполне объяснимо, существует физиологический предел скорости реакции [3]. Вариабельность времени реакции человека (RT) является специфической проблемой, представленной в литературе по экспериментальной психологии [3]. Рассматриваются как способы измерения RT, так и влияющие факторы, такие как интенсивность стимулов и др. Далее в последующие годы в рамках дифференциальной психологии исследователей заинтересовала внутриличностная изменчивость RT с традиционным акцентом на корреляцию между RT и общей психической способностью (фактор g в исследованиях интеллекта), а также исследования индивидуальных различий. Исследовались время простой реакции (Simple Reaction Time, SRT) и время реакции выбора (Choice Reaction Time, CRT) [5]. Ряд исследований проводилось на примерах ECT [4], таких как задачи визуального сканирования, или задачи, основанные на парадигме Хика (законе Хика), которые включают реакцию на визуальные стимулы из равновероятных альтернатив.

1. Экспериментальные исследования У. Хика, Р. Хаймана, П. Фиттса как базовая основа метода

Закон Хика. Закон Хика (Hick's law) впервые представлен британским психологом Уильямом Хиком (William E. Hick) в 1952 г. [6], определяет логарифмическую зависимость времени реакции от числа альтернатив возможного выбора в элементарных когнитивных задачах ECT.

Статья У. Хика «On the rate of gain of information» является классической в изучении возможностей человека. Статья занимает третье место по цитируемости в истории журнала *Quarterly Journal of Experimental Psychology (QJEP)* [7]. Исследование У. Хика называют «влиятельной достопримечательностью» («an influential landmark» [8]), что является, как отмечают авторы [8], яркой демонстрацией того, что информация и ее влияние на деятельность человека могут быть представлены количественно. Признано научным сообществом, что закон сыграл основную роль в когнитивной революции и установил один из немногих широко признанных законов в психологии, связывая время реакции выбора с количеством альтернатив стимула-реакции (или степенью неопределенности) в задачах [8]. Закон стал популярен среди исследователей экспериментальных психологов с 1950-х гг. в качестве инструмента для изучения деятельности человека по принятию решений в различных задачах, особенно времени реакции выбора.

Со времени опубликования установленный закон Хика упоминается как один из законов, применимых к взаимодействию человека с компьютером (HCI), что отражает его большое прикладное значение [9-11].

Закон Хика описывает время реакции T при выборе ответа (RT) как линейную функцию от информационной энтропии H , которая вычисляется с использованием двоичного логарифма количества вариантов ответов [12], например [13-15]:

$$T = mH,$$

$$H = \log_2(N + 1),$$

где N — число равновероятных вариантов ответов. Чем больше число N альтернатив для выбора, тем больше неопределенность и выше значение информационной энтропии выбора. Если $N=1$, то неопределенность выбора отсутствует и $H=0$. Значение константы m определяется методами регрессионного анализа по экспериментальным данным.

Для случаев, в которых альтернативы выборов не являются равновероятными, применяется формула К. Шеннона [16]:

$$H = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i,$$

где p_i — вероятность i -й альтернативы выбора.

Увеличение неопределенности стимула увеличивает время решения.

Закон Хика продолжает порождать новые исследования в настоящее время и, как отмечают авторы, являясь фундаментальным законом взаимодействия

человека с компьютером с использованием технологий, которых не существовало на момент исследования Хика [8]. Концептуально закон часто рассматривается как фундаментальный закон дизайна интерфейса. В статьях обсуждается, как на основе закона Хика можно улучшить дизайн интерфейса ([9] и др.).

Эксперименты Хаймана. Статьи о времени реакции выбора RT написаны американским психологом Рэем Хайманом (Ray Hyman) в 1953 г. Р. Хайман опубликовал близкую по теме статью о времени реакции выбора, в которой описал эксперименты, которые показали аналогичные закону Хика результаты [12]. Этот вклад является причиной того, что закон Хика также упоминается как закон Хика–Хаймана (Hick–Hyman law).

Закон Хика–Хаймана описывает линейное увеличение RT, как функцию информационной энтропии элементарного стимула, которая вычисляется как двоичный логарифм количества вариантов ответа.

Более широко распространена версия закона Хика–Хаймана для n равновероятных альтернатив [8]:

$$RT = a + b \log_2 (N),$$

где a, b — параметры, значения которых определяются методом наименьших квадратов по экспериментальным данным [17].

Большинство исследований проводилось с целью измерения времени реакции выбора на очень простых задачах [9]. Неясно, насколько взаимосвязь между временем и информацией имеет значение для более сложных задач, или, которые, например, требуют принятия решений из большего числа альтернатив.

Применение закона Хика–Хаймана в случаях более общей и комплексной модели стимулов в сериях задач (Serial Reaction Time, SRT) было исследовано недостаточно [18, 19]. Нерешенная проблема оценки информационной энтропии сложных стимулов приводит к ограниченному применению закона Хика–Хаймана на практике, например, при проектировании сложных визуальных интерфейсов (user interface, UI) в системах человеко-машинного взаимодействия HCI.

Исследования П. Фиттса. Американский психолог Пол М. Фиттс (Paul Morris Fitts) изучал информационную способность двигательной системы, которая определяется последовательностью производить один класс движения из нескольких альтернативных классов. Информационная емкость конкретного типа «ответа» тем больше, чем больше количество альтернативных классов. Эксперименты были ограничены двигательными задачами, в которых необходимо дать последовательные ответы (реакции) с заданной амплитудой движения. Информация в экспериментах генерируется дискретными приращениями, которые добавляются с каждым последующим «ответом» (реакцией). Полом М. Фиттсом в 1954 г. предложен индекс производительности (IP, бит в секунду), отражающий меру производительности человека, названный законом Фиттса (Fitts' law) [20]. Показатель сочетает в себе индекс сложности (ID) задачи и время движения (MT, в секундах) при выборе цели.

Актуальность современных исследований. Парадигма выбора-реакции — классическая тема в изучении человеческих возможностей, которая по-прежнему актуальна для современных исследований [9]. Любая профессиональная деятельность все больше включает электронную среду, насыщенную информацией различной модальности и объема, где приходится решать задачи, осуществлять выбор, принимать решения среди альтернативных вариантов, многие из которых характеризуются наличием визуальной неопределенности. Изучению эффекта визуальной формы на воспринимаемую (не) определенность (perceived (un) certainty) посвящены отдельные исследования, где, например, показано, что восприятие диапазонов неопределенности человеком может быть неоднородным и зависеть от внутренних моделей интерпретации [20]. Чем труднее что-то увидеть или распознать, тем более неопределенным кажется [22]. Неопределенная информация может отображаться в различных форматах, от простого текста до графических представлений или текстовых/графических гибридов. Вопрос о том, как представлять или отображать неопределенную информацию, важен с двух точек зрения [22]. Во-первых, теоретически необходимо определить, как разные представления или форматы могут повлиять на понимание пользователями неопределенности и далее на принятие решений. Во-вторых, необходимо определить лучший способ отображения информации для пользователей, особенно когда неопределенность связана с большим количеством объектов или точек данных [22]. Исследования показали, что такие факторы, как содержание задачи, опыт и формат представления информации могут увеличивать когнитивную нагрузку и влиять на степень отклонения рассуждений людей от нормативных рассуждений в различных контекстах.

В свою очередь автора настоящей статьи заинтересовал вопрос исследования влияния индивидуальных когнитивных особенностей восприятия на точность воспринимаемых визуальных объектов с наличием неопределенности в стимулах, и на принятие решений в зависимости от точности и скорости субъективной интерпретации.

2. Применение когнитивной науки в образовательной практике

Более 25 лет назад (считая появление первых публикаций в конце прошлого века, в 1990-е гг.) применение когнитивной науки в образовательной практике было начинающим. К началу XXI века (примерно к 2005 г.) большая часть когнитивной науки достигла уровня зрелости [23].

К настоящему времени, стало развиваться направление применения когнитивной теории к образовательным системам. Теория когнитивной нагрузки (Cognitive Load Theory, CLT) стала одной из самых успешных и влиятельных в теоретическом объяснении когнитивной обработки во время обучения. Однако, когнитивно-ориентированный тип обучения, как правило, не предусмотрен в типовых познавательных программах. Отдельное направление исследований представляет изучение когнитивной нагрузки, Cognitive

Load (CL), в условиях переизбытка информационных ресурсов современной образовательной среды.

Центральное положение CLT составляет фактор ограничения рабочей памяти на процессы обработки информации и элементы, требующие определенной емкости [24]. Подтверждено исследованиями, что рабочая память может обрабатывать только ограниченное количество элементов, в отличие от долговременной памяти, одной из очевидных функций которой является организация и хранение знаний в виде определенных «схем». Формирование схем уменьшает нагрузку на рабочую память. Схемы могут включать большое количество информации, элементов и связей между ними. Важную роль играет процесс автоматизации. Автоматическая обработка в значительной степени игнорирует рабочую память и имеет совершенно другие характеристики по сравнению с сознательной обработкой информации, которая происходит в рабочей памяти. При достаточной практике обработка информации может проводиться с использованием автоматизированных правил, с минимальными сознательными усилиями (т. е. с минимальной нагрузкой на рабочую память). В отсутствие правил (например, при решении незнакомых, новых задач), большая часть или, возможно, вся рабочая память может быть занята поиском правил, что может привести к затруднениям в поиске решения. Производительность на незнакомых задачах можно изучать с максимальной эффективностью, потому что в этом случае доступен максимальный объем оперативной/рабочей памяти. Легкость, с которой информация может обрабатываться в рабочей памяти, является основной проблемой теории когнитивной нагрузки.

Поскольку в одном абзаце трудно представить все идеи CLT, к настоящему времени достаточно развитой и представленной в целом ряде публикаций ([24, 25] и др.), кратко представим типы когнитивной нагрузки CL. На основе имеющихся публикаций дадим пояснения по каждому виду когнитивной нагрузки в соответствии с терминологией авторов статей [25-28].

Выделены три типа CL: Intrinsic Load (IL), Extrinsic Load (EL), Germane Load (GL). Intrinsic Load (IL) — вид когнитивной нагрузки, который отражает внутренние характеристики, те или иные свойства, присущие изучаемому или воспринимаемому объекту, задаче, ситуации, явлению. Учебный материал, характеризующийся высокой интерактивностью элементов, сложными взаимосвязями элементов, которые должны обрабатываться одновременно, приводит к высокой внутренней когнитивной нагрузке. Элемент — это информация, которую может обработать конкретный учащийся как единое целое в рабочей памяти. В публикациях используется понятие схемы, образующей когнитивную конструкцию, которая организует и классифицирует элементы информации и сохраняет их в долговременной памяти ([29] и др.), таким образом понижая уровень когнитивной нагрузки. Схема допускает использование нескольких элементов информации и рассматривается как единый элемент [26]. Extrinsic Load (EL) — вид когнитивной нагрузки, которая может быть определена как посторонняя информация, не являющаяся необходимой

при восприятии, содержащая неточности, побочную информацию, и не способствующая ходу рассуждений при поиске решения определенной задачи. Форма или средства, какими передается информация, созданная, например, разработчиками учебных материалов, относится к посторонней когнитивной нагрузке. Посторонняя познавательная нагрузка порождается методикой обучения или форматом учебного материала [30]. Наличие источников информации, которые не способствуют получению схемы или автоматизации мешают обучению [26].

Germane Load (GL) — вид когнитивной нагрузки, которая является целесообразной, подходящей и актуальной для восприятия и решения задачи, соответствующей уровню знаний и умений человека.

С целью более детального пояснения терминологии мы обратились к словарю синонимов (sinonim.org). Для характеристики IL подходят следующие определения — реальная, характерная, имманентная, внутренне обусловленная нагрузка (sinonim.org). Синонимами EL могут быть определения — излишняя, побочная (sinonim.org). Для характеристики GL подходят определения — приемлемая, корректная, рациональная, достижимая, посильная, соразмерная, благоприятная (sinonim.org).

Все когнитивные эффекты нагрузки предназначены для указания наилучшего способа представления информации, который способствует продуктивности обучения.

Большинство показателей информационной сложности относятся исключительно к характеристикам информации [28] и к типу IL.

Инновационные методы обучения, насыщенные динамикой, визуализацией информации, тренажерами, имитационными системами, сложными инструкциями, могут повышать CL, тем более что индивидуальные способы обучающихся, оптимизирующие работу с информацией, те, что выходят за рамки простейшей познавательной деятельности, ненаблюдаемые в традиционном учебном процессе.

Встает вопрос об организации, регулировании, адаптации учебных ресурсов, который становится особенно актуальным в условиях повышенной когнитивной нагрузки.

Существующие исследования субъективных оценок когнитивной нагрузки демонстрируют возможность учитывать разные факторы когнитивной нагрузки по обработке релевантной и нерелевантной информации различной модальности.

Способы измерения когнитивной нагрузки представляют отдельную задачу. Несмотря на публикации, в которых приводятся примеры различных способов измерения CL, однозначных рекомендаций нет. Основные категории методов классифицированы на субъективные, физиологические показатели и показатели, основанные на задачах и результатах. В каждой категории используется ряд методов индивидуальной оценки [31].

Для регулирования когнитивной нагрузки необходимо учитывать различные виды неопределенностей, а именно те виды, которые влияют на внешнюю IL и внутреннюю CL когнитивную нагрузку. Наиболее

подходящим способом оценки рабочей нагрузки для конечных приложений является эксперимент [31]. В настоящей статье мы исследуем решение незнакомых задач со сложной моделью стимулов.

3. Метод оценки производительности решения серии задач выбора со сложной моделью стимулов в условиях визуальной неопределенности

Системы обучения ввиду сложившихся объективных обстоятельств вынуждены переходить в электронный (дистанционный) режим обучения в различных форматах. Зачастую у преподавателя не остается выбора и времени на то, чтобы сориентироваться в группе обучающихся, в том, какие студенты будут обучаться, каковы способности, возможности и потребности у обучающихся.

В академической сфере недостаточно используется когнитивный потенциал учащихся для развития их профессиональных компетенций. Чтобы исследовать и найти способы использования этого потенциала в учебном процессе, в статье описываются исследования компонентов когнитивно-стилевого потенциала и способа оценивания когнитивной нагрузки с целью индивидуальной адаптации учебного контента на примере исследования решения серии сложных задач.

С целью исследования серии задач предлагается методика, реализованная в компьютерной версии, на основе теста Дж. Кагана (J. Kagan, [32]) MFFT-12 (Matching Familiar Figures Test, «Выбор парной фигуры», или «Сравнение сходных фигур»). MFFT-12 является классическим тестом, наиболее надежным и авторитетным в мировой практике методом диагностики показателя когнитивного стиля «импульсивность–рефлексивность» (Impulsivity-Reflexivity, I-R, или Reflection-Impulsivity, R-I). Задания, основанные на стимульном материале методики Дж. Кагана, относятся к классу сложных задач с наличием визуальной неопределенности в изображениях, усложняющей процесс принятия решений за счет элементов схожести, трудных для распознавания, и требующих определенных когнитивных усилий и временных затрат для поиска решения. Рассмотрение задач в контексте визуальной неопределенности позволило применить

новые способы работы с данной методикой в изучении продуктивности познавательной деятельности и когнитивной эффективности обучающихся.

Когнитивный стиль, называемый Impulsivity-Reflexivity, активно использовался в психологии и в сфере образовании с тех пор, как Дж. Каган описал его как теоретическую биполярную конструкцию на основе двух показателей [32]. Первый показатель — время ответа, или концептуальный темп, то есть время, или период, который субъект тратит на размышление, анализ данных в задачах, которые представляют некоторую степень неопределенности, и в которых ответ не является очевидным. Этот период времени может различаться у разных людей. Второй показатель — точность, измеряемая числом допущенных ошибок. Данный показатель также различается и характеризует качество исполнения заданий. Импульсивные люди могут быстро принимать решения, ориентируясь на первую гипотезу без проверки ее точности. Рефлексивные люди более взвешенно и обдуманно принимают решения, рассматривая альтернативные варианты. Соответственно, больше времени может тратиться на принятие решений. В последствии в различных исследованиях было доказано влияние показателя I-R на несколько сфер личности, а именно поведения и обучения. Экспериментальными исследованиями подтверждено влияние импульсивности–рефлексивности на познавательные процессы, академические достижения, внимание, когнитивное развитие и умственные способности, метапознание, самоконтроль, решение проблем (в частности, [33] и др.).

Исследования данного когнитивного стиля представлены в работах многих ученых (например, [34–36]), однако анализ восприятия стимульного материала методики с точки зрения оценивания информации и учета визуальной неопределенности не проводился. Исследования проводились в постановке автора методики Дж. Кагана. Что касается анализа данных, в основном используются традиционные подходы, основанные на статистических методах и данных, полученных в частных исследованиях. В имеющихся публикациях отмечается отсутствие нормативных данных по методике.

В отличие от статистических методов анализа, традиционно демонстрирующих корреляционные связи, современные средства позволяют использовать интеллектуальные методы анализа данных, позволяющие получать новые результаты из исследуемых данных.

Компьютерная версия теста Кагана. Процедура исследования. Компьютерная версия модифицированного теста Дж. Кагана MFFT-12 реализована в веб-среде и включает серию из 12 рисуночных задач, в каждой из которых тестируемому предъявляется в верхней части экрана изображение фигуры-эталона, а в нижней — 8 идентичных изображений, среди которых необходимо выбрать только одно, полностью совпадающее с эталоном, используя как можно меньше попыток (рис. 1) [37]. Инструкция по выполнению задач представлена участникам для ознакомления перед выполнением заданий без ограничения по времени. Перед выполнением заданий методики предложено пробное (тренировочное) задание. Затем участники

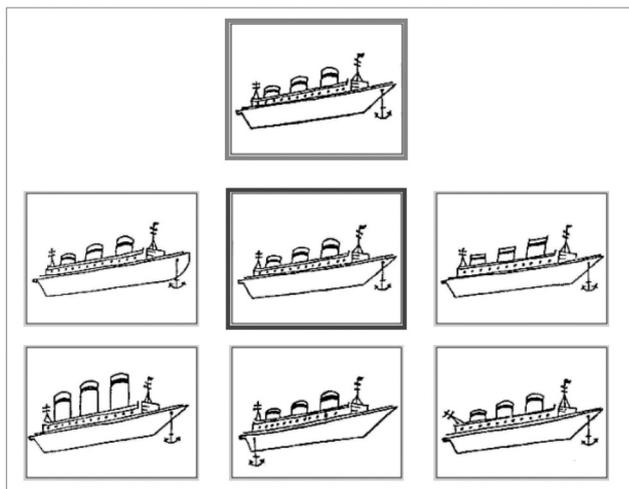


Рис. 1. Пример тренировочного задания

выполняли задания методики с одним прогоном из 12 блоков задач (по одному блоку для каждого условия с любым количеством попыток в каждом блоке) без ограничения по времени.

Перед испытуемыми ставилась цель тестирования: в серии из 12 блоков задач, используя как можно меньше попыток, найти из восьми фигур нижнего ряда одну фигуру, которая в точности соответствует заданной фигуре в верхнем ряду. Как видно из рис. 1, в задачах стимулы малоконтрастны по отношению к эталону для точного различения, что значительно повышает когнитивную нагрузку (типа *IL*) при восприятии информации испытуемыми. Попытки могут повторяться до правильного выбора. При правильном ответе — автоматически осуществляется переход к следующему заданию. Выбор изображения-ответа осуществлялся с помощью компьютерной «мышки». Для того, чтобы исключить возможные сетевые задержки при отображении изображений реализована предварительная загрузка всех изображений в память компьютера до начала сессии работы с методикой.

В тестировании приняли участие две группы испытуемых в возрасте от 18 до 19 лет: (группа «а») 32 студента направления обучения медицинской специализации, (группа «б») 28 студентов по направлению обучения компьютерным технологиям и информатике.

Все действия испытуемых регистрировались в памяти компьютера и сохранялись в базе данных: идентификаторы выбранных изображений и отметки времени выбора фиксировались с помощью таймера с точностью до 0,1 с.

Анализ результатов тестирования студентов состоит из двух этапов:

- 1) оценка принадлежности студента к одному из четырех типов по шкале I-R на основе различий среднего времени первой реакции и числа ошибок: «быстрый – точный», «быстрый – неточный», «медленный – точный», «медленный – неточный»;
- 2) оценка скорости обработки информации на основе модели Хика–Хаймана.

Результаты оценки параметра I-R когнитивного стиля могут применяться при прогнозе успешности обучения и выполнении профессиональной деятельности. Например, в статье [38] приводятся результаты экспериментального подтверждения того, что учащиеся, относящиеся к рефлексивному типу лучше понимают прочитанное, чем импульсивные. Основное различие между показателями по шкале I-R заключается в типе сканирования информации и использовании разных стратегий [36].

В соответствии с гипотезой об уменьшении энтропии (*entropy-reduction hypothesis*) сложность когнитивной обработки определяется неопределенностью стимулов. Предполагается, что более информативные стимулы увеличивают когнитивную нагрузку. Некоторые результаты исследований подтверждают наличие положительной связи между энтропией сигнала (например, текста) и временем его обработки (чтения), но при этом отмечается сложность проблемы оценки информационной энтропии реальных сигналов на практике с позиции теории информации [39].

4. Применение алгоритмического подхода к измерению количества информационной энтропии стимулов

Процедура оценки количества информационной энтропии в изображениях осуществляется на основе многоуровневого подхода и включает ряд этапов:

- 1) обработка и анализ пикселей изображений;
- 2) извлечение знаний из изображений в виде базовых форм: линий, прямоугольников, эллипсов, полигонов, последовательностей точек (*path*) и др.;
- 3) семантическая аннотация изображений: обнаружение, распознавание и классификация объектов, сегментация, семантическая разметка изображений [40].

На уровне пикселей изображений оценка среднего количества информации, приходящегося на один символ источника, называемого энтропией (или неопределенностью источника, H), определяется по формуле К. Шеннона, если интенсивность пикселей представляет статистически независимые случайные события из дискретного набора случайных значений $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ с ассоциированными вероятностями $\{P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_n)\}$:

$$H = \sum_{i=1}^N P(a_i) \log_2 P(a_i).$$

При вычислении энтропии изображения используется гистограмма для оценки вероятностей символов источника [41].

Статистический подход К. Шеннона к измерению количества информационной энтропии используется в основе оценки эффективности методов сжатия изображений: LZW, RLE, Deflate и др. [42]. Алгоритм Lempel-Ziv-Welch (LZW), универсальный алгоритм сжатия данных без потерь, разработан А. Лемпелем, Я. Зивом и Т. Велчем в 1984 г. Алгоритм Run-length encoding (RLE), алгоритм сжатия данных без потерь, разработан в 1967 г. и запатентован компанией Hitachi в 1983 г. Алгоритм Deflate, алгоритм сжатия данных без потерь, разработан Ф. Кацем в 1996 г. на основе алгоритма LZ77 и алгоритма оптимального префиксного кодирования Д. Хаффмана. С практической точки зрения использование алгоритмов сжатия изображений позволяет получить приблизительную оценку неопределенности, которая в соответствии с теоремой К. Шеннона не может быть ниже значения статистической меры энтропии, т. е. средняя длина кода не может быть меньше, чем H бит/пиксель.

В тех случаях, когда изображения, используемые в условиях серии задач выбора, не являются независимыми, используется условная энтропия [43].

Алгоритмический подход к измерению количества информационной энтропии предложен А. Н. Колмогоровым [44]. Оценка количества алгоритмической энтропии заключается в оценке минимальной длины программы, описывающей эту информацию. Алгоритмическая энтропия, или Колмогоровская сложность описания битовой строки s программы P_r на языке $L(K(s), H_r)$ оценивается значением $d(s)$ минимальной длины программы P_r , которая описывает s , при задан-

ной метрике d длины программы P_r . В нашем подходе мы используем в качестве алгоритмической меры энтропии (сложности) изображения длину описания этого изображения на языке форм векторной графики (Scalable Vector Graphics, SVG) [45]. Элементами языка SVG являются, например, команды рисования фигур: прямоугольник (rectangle), окружность (circle), эллипс (ellipse), полигон (polygon), линия (line), атрибуты которых задают координаты, толщину линий и др. Результаты исследований гештальт-принципов восприятия информации показывают, что при обработке зрительной информации используются структуры, меры сложности которых сильно коррелированы с показателями эффективности их обработки человеком (например, [18, 19, 46]).

При семантическом подходе к измерению количества информации используется семантическая аннотация изображений, классификация пикселей, формирование кластеров и присвоение им семантических меток с применением методов нейронных сетей для классификации объектов [40, 47, 48]. Кибернетический подход к решению задачи выбора из нескольких альтернатив осуществляется при структурировании процессов восприятия (perception) изображений, извлечении семантической информации, классификации, принятия решений и реализации действий.

В исследованиях по измерению визуальной сложности (Visual Complexity, VC) более сложных задач по сравнению с элементарными задачами ЕСТ, в частности человеко-компьютерных пользовательских интерфейсах, используются различные алгоритмы сжатия изображений, например, RLE и Deflate [46].

В данной работе мы анализируем модель 2-го уровня для представления элементов объектов в изображениях в виде типовых форм (прямой линии, прямоугольника, окружности, эллипса, кривой линии, полигона и др.). На первом уровне модель растрового изображения представлена в виде матрицы пикселей. Модель 2-го уровня формируется на основе пиксельной модели 1-го уровня. На втором уровне модель автоматически преобразуется программой в формат масштабируемой векторной графики.

5. Результаты исследований

Факторы, влияющие на продуктивность решения серии задач выбора выделены в две группы: первая группа связана с теми или иными свойствами стимулов, вторая — с индивидуальными когнитивными (психологическими) особенностями человека и свойствами реагировать на стимулы. Приведены исследования на материале графического формата.

Исследование на основе методики Дж. Кагана.

Гипотеза исследования. В задачах графического формата время выбора решения зависит от фактора алгоритмической энтропии предъявляемых стимулов.

На первом этапе анализа производилась классификация студентов на четыре подгруппы по показателю когнитивного стиля «импульсивность–рефлексивность».

Данные, предварительно полученные по результатам выполнения методики Кагана студентами в группах «а» и «б», изображены на рис. 2. В качестве измеряемых показателей фиксировались среднее время первого ответа и среднее число ошибок в группах «а» и «б». Пунктирные линии отражают границы классификации подгрупп студентов по 4 типам, условно названных:

- «быстрый–неточный», импульсивный–неточный (Impulsivity-Inaccurate¹, I-In) (верхний левый квадрант);
- «быстрый–точный», импульсивный–точный (Impulsivity-Accurate, I-Ac) (нижний левый квадрант);
- «медленный–точный», рефлексивный–точный (Reflexivity-Accurate, R-Ac) — (нижний правый квадрант);
- «медленный–неточный», рефлексивный–неточный (Reflexivity-Inaccurate, R-In) (верхний правый квадрант).

Классификация осуществляется в соответствии с продукционной моделью, полученной экспериментально, правила которой задают границы подгрупп классификации. В зависимости от задачи исследования, от практического применения модели, диапазона условий реальной среды и группы испытуемых

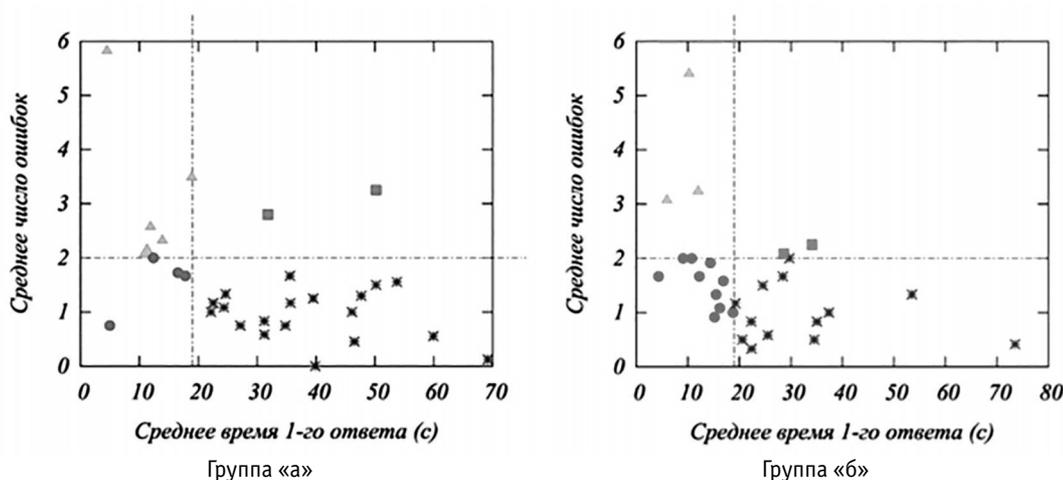


Рис. 2. Классификация студентов по показателю I-R в группах «а» и «б»

¹ Обозначения введены автором настоящей статьи.

Таблица 1

Процентные соотношения числа студентов с различными типами когнитивного стиля I-R от общего числа студентов

№	Тип	Доля, %	
		P_a	P_b
1	I-Ac	12,5	35,7
2	I-In	18,75	10,7
3	R-Ac	62,5	46,4
4	R-In	6,25	7,2

устанавливается допустимая «жесткость» правил при помощи гибко настраиваемых коэффициентов, т. е. устанавливаются более строгие критерии выполнения задач. В рассматриваемом примере для групп студентов точность решения задач установлена не так строго, т. е. допускается решение задач не с первого раза. Если требуется решать задачи, связанные с профессиональной деятельностью, где не допускается ни одной ошибки в принятии решений и требуется быстрота принятия решений с высокой точностью (мгновенность принятия решений), то для таких групп испытуемых правила задаются по-другому, более «жестко».

Число студентов, точно решающих задачи составило 75% в группе «а» и 82,1% в группе «б». Однако, различия в группах проявились по времени принятия решений. По числу студентов, решающих задачи и быстро, и точно (подгруппа I-Ac по классификации), группа «б» превосходит группу «а» почти в 3 раза. Одним из объяснений может служить предположение о наличии больших навыков по решению задач на компьютере у студентов, специализирующихся в области компьютерных технологий и информатики.

Процентные соотношения числа студентов с различными типами когнитивного стиля I-R от общего числа студентов в группе отражены в табл. 1.

На графиках рис. 3 изображено среднее время решения серии задач в группах «а» (отмечено точками) и «б» (отмечено квадратами). Пунктирными линиями изображены линейные тренды: «а» $T=39,734 N$, $R^2=0,989$; «б» $T=23,91 N$, $R^2=0,997$.

Заметны отклонения точек от линейного тренда времени решения серии задач, например, в группе «а» при решении некоторых задач, например, № 3, 4, 7.

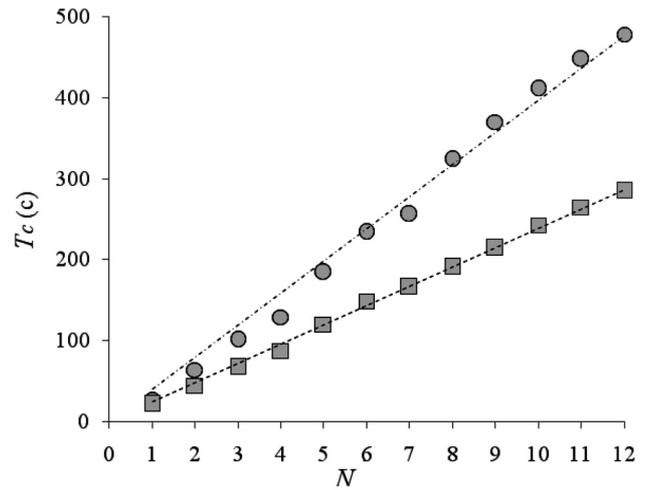


Рис. 3. Среднее время решения серии задач в группах «а» и «б»

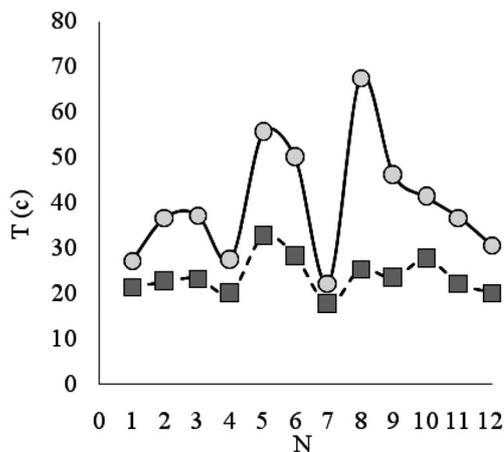
В группе «б» отклонения времени решения (обозначены квадратами) от линейного тренда меньше по абсолютному значению, чем в группе «а», что связано с более высокой средней производительностью почти в 1,5 раза.

В каждой из 12 задач число вариантов выбора одинаковое и равно восьми. Поэтому для объяснения наблюдаемых различий во времени реакции в задачах был предложен фактор количества информационной энтропии в вариантах ответов задач.

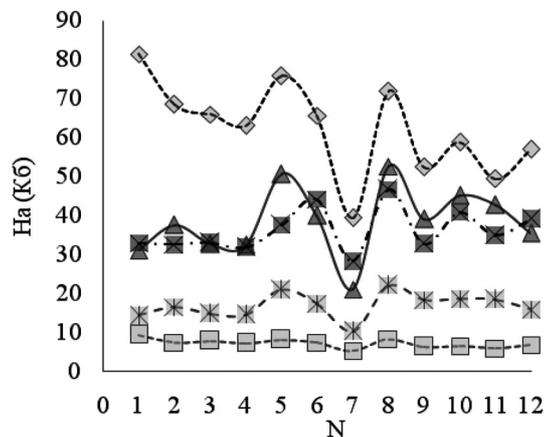
На втором этапе исследований для того, чтобы определить степень сложности стимулов мы применили несколько методов оценки количества информационной энтропии изображений, используемых в качестве стимулов — альтернативных вариантов в задачах выбора.

В соответствии с изложенными выше методами произведены оценки количества информационной энтропии в изображениях.

На рис. 4, а продемонстрированы средние значения времени решения задач в группе «а» — «точки», и в группе «б» — «квадраты». На рис. 4, б изображены некоторые оценки алгоритмической энтропии, выполненные с применением различных форматов описания изображений.



а



б

Рис. 4. Среднее время решения задач (а) и оценки количества алгоритмической энтропии (б) изображений задач

Оценки значений коэффициентов корреляции Пирсона, выражающие взаимосвязи между мерами количества информационной энтропии в задачах № 1-12 в группах «а» и «б» и временем их решения

Среднее время решения задач	Коэффициент корреляции r				
	Энтропия изображений (gif)	Размер изображений (gif)	Энтропия изображений (svg)	Размер изображений (svg)	Размер сжатых (LZW) изображений (svg)
Т _а	0,335	0,387	0,764	0,883	0,896
Т _б	0,365	0,485	0,605	0,792	0,76

На графике (рис. 4, б) использованы следующие обозначения:

- «ромб» — размер изображений (gif) в Кб;
- «треугольник» — размер изображений (svg) в Кб;
- «крест» — энтропия изображений (svg) в Кб;
- «звезда» — размер сжатых (LZW) изображений (svg) в Кб;
- «квадрат» — энтропия изображений (gif) в Кб.

Затем были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между полученными мерами и средними временами решения задач в группах «а» и «б». Значения сильной корреляции ($r > 0,7$) были получены между вариантами вычисления мер алгоритмической энтропии (сложности) А. Н. Колмогорова и средними временами решения задач. Наибольшая корреляционная связь времени решения задач была установлена с размерами изображений в SVG-формате, содержащем инструкции для программы восстановления изображения в виде векторной графики, а также с размерами SVG-изображений, сжатых при помощи алгоритма LZW.

В табл. 2 приведены некоторые оценки значений коэффициентов корреляции Пирсона, выражающие взаимосвязи между мерами количества информационной энтропии в задачах № 1-12 в группах «а» и «б» и временем их решения.

На графике (рис. 5) показан пример зависимости среднего времени решения серии задач в группах «а» (отмечено точками) и «б» (отмечено квадратами) от H_K — количества алгоритмической энтропии (сложности). H_K оценивалась суммарным размером

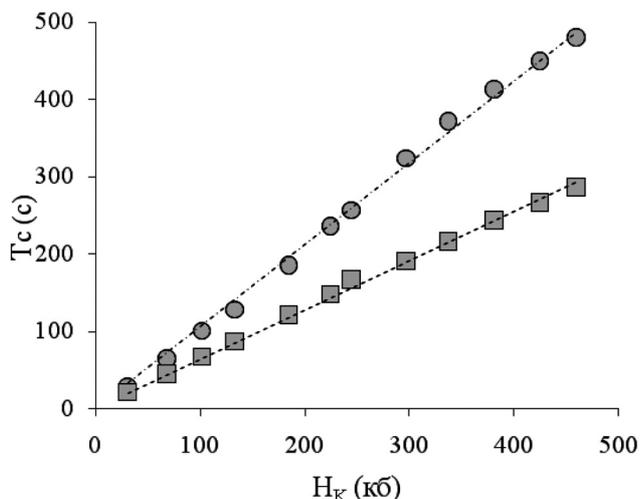


Рис. 5. Зависимость среднего времени решения серии задач в группах «а» и «б» от количества алгоритмической энтропии А. Н. Колмогорова (H_K)

SVG-изображений условий (стимулов) задач в Кб, который характеризуется высоким значением коэффициента корреляции. Пунктирными линиями показаны линейные тренды: «а» $T=1,059 H_K, R^2 = 0,997$; «б» $T= 0,637 H_K, R^2 = 0,997$.

По сравнению с графиком на рис. 3 возросло значение коэффициента детерминации $R^2=0,997$ в группе «а» и уменьшились наблюдавшиеся ранее отклонения точек от линейного тренда времени решения серии задач.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученные результаты подтверждают применимость закона Хика к предсказанию времени решения серии задач со сложной моделью стимулов с визуальной неопределенностью на основе количества алгоритмической энтропии (сложности) и разработанного метода его оценки с использованием SVG-формата векторной графики:

$$T = m H_K$$

Результаты получены в программе интеллектуального анализа продуктивности решения когнитивных задач в электронной среде (Эксперт-Аналитик ART) методами анализа точности и времени реакции в задачах выбора [49], в которой производится обработка, анализ, предсказание и визуализация наборов данных, представляющих результаты выполнения студентами серии задач в составе программного комплекса Онто-Мастер [49].

На следующем этапе решалась тестовая задача предсказания времени решения задач при проектировании учебных контрольных тестов, содержащих варианты выбора в виде графических схем. В качестве примера использовались схемы, созданные в среде моделирования Matlab Simulink (<https://www.mathworks.com>).

Для предсказания времени использовалась полученная на предыдущем этапе регрессионная модель, описывающая зависимость среднего времени решения серии задач от количества алгоритмической энтропии (сложности, информации) стимулов, оцениваемого размером изображения в формате векторной графики.

На рис. 6 изображен пример схемы № 1, на рис. 7 пример изображения графической схемы № 2. Схемы приведены в формате масштабируемой векторной графики SVG.

В табл. 3 представлены результаты измерения алгоритмической информационной энтропии графических схем и предсказания времени перцептивно-когнитивной обработки на основе регрессионных моделей, полученных ранее.

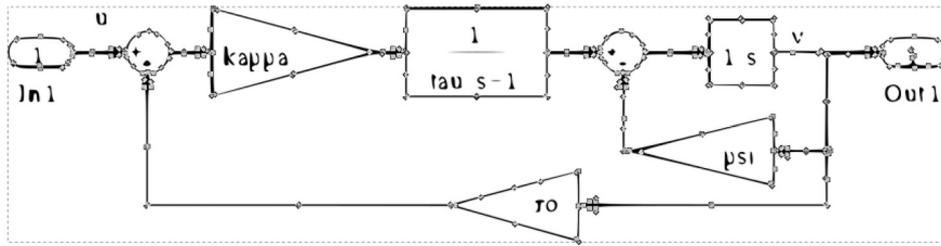


Рис. 6. Изображение схемы № 1 в векторном формате

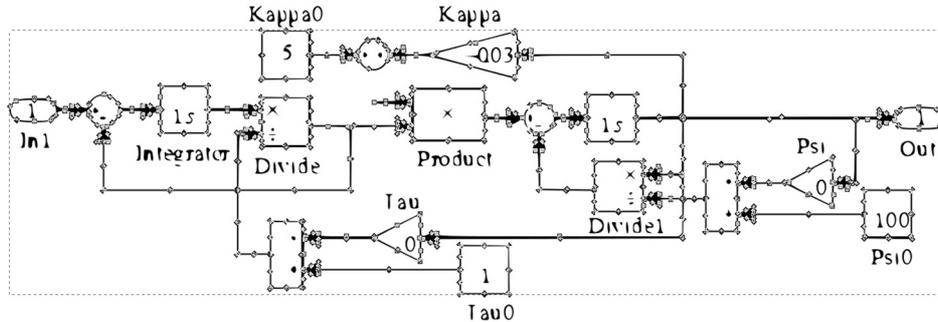


Рис. 7. Изображение схемы № 2

В тесте Дж. Кагана средняя скорость восприятия, когнитивной обработки и моторных действий по осуществлению операций выбора составили 0,63 Кб/с в группе «а», до 1 Кб/с в группе «б». Поэтому на основе среднего времени решения серии тестовых задач с визуальной неопределенностью, предсказание времени составляет для схемы № 1 – 25,3 с, схемы № 2 – 47,4 с (группа «а»), и 15,2 с, 28,5 с для группы «б».

Результаты предсказания времени перцептивно-когнитивной обработки изображений схем представлены в табл. 3

С целью оценки сложности графических изображений введены следующие метрики (приведены результаты сравнения сложности схемы № 2 по сравнению с изображением схемы № 1):

- число вершин $|V|$ больше в 2 раза;
- число ребер $|E|$ больше в ~2 раза;
- $\log_2 |V|$ больше в ~1.4 раза [50];
- значение цикломатического числа $|E| - |V| + P$ выше в 2 раза, где P – количество компонент связности [51].

Результаты показывают, что предсказываемое время для второй схемы приблизительно в 1,9 раза превышает время для первой схемы.

6. Заключение

В процессе решения когнитивных задач различной модальности студентами возникает неопределенность не только из-за свойств стимульного материала входной информации, но также и из-за индивидуальных

когнитивных характеристик, влияющих на восприятие информации.

Разработанный метод автоматизированного анализа продуктивности решения серий перцептивно-когнитивных задач основан на модели, интегрирующей факторы информационной нагрузки и индивидуальные факторы когнитивно-стилевого потенциала, характеризующие персональный когнитивный стиль обработки информации. В результате проведенного исследования подтверждается гипотеза о зависимости времени выбора решений от фактора алгоритмической энтропии предъявляемых графических стимулов, а также зависимость от когнитивно-стилевого потенциала (в измерении когнитивного стиля) обучающихся.

Метод применен к двум наборам экспериментальных данных, на основе которых демонстрируются различия в производительности выполнения перцептивно-когнитивных задач между двумя группами испытуемых. Результат может быть объяснен тем, что студенты факультета компьютерных технологий в среднем обладают большими начальными компьютерными навыками решения задач в условиях визуальной неопределенности, чем студенты медицинского факультета, для которых информатика и информационные технологии (computer science) не являются основным видом профессиональной деятельности.

Метод реализован в автоматизированной среде и применяется при проведении научных исследований и обучения студентов. Программный комплекс отличается многоплатформенной реализацией интегрированного набора функций поиска закономерностей в накопленных данных, построения моделей, которые

Таблица 3

Результаты предсказания времени перцептивно-когнитивной обработки изображений схем

№ изображения	Размер изображения (svg), Кб	Предсказание времени решения задачи (с), группа «а»	Предсказание времени решения задачи (с), группа «б»
1	23,927	25,3	15,2
2	44,783	47,4	28,5

объясняют найденные закономерности и прогнозируют результаты выполнения последовательностей когнитивных задач. Тестирование разработанного метода и программ проведено на двух различающихся наборах данных, полученных в результате решения задач студентами медицинского и технического направлений обучения. Тестовые задачи представлены в виде набора перцептивно-когнитивных задач классического теста Дж. Кагана MFFT-12, реализованного в компьютерной версии методики. Задачи на выявление сходства/различий в фигурах теста относятся к классу задач, содержащих визуальную неопределенность.

Результаты подтверждают необходимость адаптации учебного контента на основе регулирования когнитивной нагрузки с учетом когнитивного потенциала обучающихся.

7. Общее обсуждение

Сейчас во многих исследованиях уделяется особое внимание развитию и применению прогнозируемых, надежных и выполнимых количественных моделей поведения человека.

Теория когнитивной нагрузки основана на предположении, что форма, структура, интерактивность, модальность информации и когнитивная архитектура человека находятся во взаимодействии, которое в значительной степени определяет продуктивность учебного процесса.

Для определения индикаторов когнитивной деятельности (например, параметров когнитивных стилей) необходимо использовать интеллектуальный анализ данных. На основе анализа существующих исследований когнитивной нагрузки, способов измерения CL, мы представляем новый метод адаптации учебного контента на основе измерения и регулирования когнитивной нагрузки для мотивации будущих исследований.

Предварительная классификация студентов на подгруппы по параметру когнитивного стиля «импульсивность–рефлексивность» может выделить тех студентов, кто будет решать сложные когнитивные задачи наиболее быстро и точно. Для тех студентов, у которых диагностируются некоторые сложности в когнитивной обработке информации, необходим индивидуальный подход с использованием интеллектуальной системы рекомендаций, например, увеличение времени решения задач или применение новых стратегий и адаптивных инструкций. При работе с очень сложной информацией, внутренняя когнитивная нагрузка IL должна быть уменьшена, или представлена дискретными информационными блоками, модулями с последовательной обработкой информационных элементов, что позволит существенно снизить нагрузку на рабочую память. Вместе с тем, информация, которая важна для менее успешных (менее продуктивных) студентов, понижающая для них IL-тип нагрузки, может являться помехой для успешных (более продуктивных) обучающихся, что будет увеличивать для них EL-тип нагрузки. Тем самым можно получить обратный эффект. Соответственно, рекомендуются стратегии регулирования CL, учитывающие также и разный уровень знаний.

Вопрос об измерении CL остается открытым. В публикациях отсутствуют однозначные рекомендации. В предложенном методе практической оценки когнитивной нагрузки в задачах с визуальной неопределенностью применяется новый подход, основанный на применении алгоритмов сжатия изображений и преобразования в формат векторной графики (SVG), что позволяет оценить сложность графических изображений и соотнести стимульный материал с возможностями восприятия информации студентами.

Применение разработанного метода позволяет повысить точность предсказания продуктивности (времени решения и числа допускаемых ошибок) решения задач студентами, в частности при тестировании и контроле знаний в учебном процессе, при прогнозировании учебных достижений в серии новых познавательных задач с наличием визуальной неопределенности. Как показывают новейшие исследования, неопределенность может варьироваться из-за множества факторов когнитивной нагрузки (как внешних, касающихся стимульного материала, так и внутренних, характеризующих индивидуальные особенности человека).

В ходе наших исследований мы заметили влияние еще одного фактора на результаты тестирования, который назвали «фактором добровольного участия» испытуемых. Данные, которые были получены в «обязательном тестировании», предложенном студентам, отличались от данных, полученных при «добровольном тестировании». В условиях «обязательного тестирования» некоторые данные демонстрировали случайный выбор или случайное принятие решений студентами, что очевидно показало недостоверные результаты и потребовало исключения результатов из базы данных. Положительным результатом выявленного фактора явился разработанный модуль проверки недостоверности данных. Феномен «добровольного/обязательного участия», как фактор повышения когнитивной нагрузки, представляет интерес для дальнейших исследований, особенно в условиях обязательного тестирования уровня знаний, зачастую применяемого в учебном процессе.

Индивидуальные факторы когнитивно-стилевого потенциала обучающихся, характеризующие познавательно-мыслительные процессы (память, внимание, восприятие) и действия на их основе интегрированы в ПО разработанной среды обучения и являются приоритетом для будущих исследований. Далее планируется применить разработанный метод на других наборах данных, полученных при решении серии задач выбора (принятия решений) в условиях неопределенности, и исследовать на их основе анализ точности прогнозирования результатов в среде электронного обучения с учетом большего числа факторов, влияющих на когнитивную нагрузку.

Автор благодарит к. т. н., доцента СПбГЭТУ «ЛЭТИ» А. С. Писарева за разработку, тестирование и отладку программ комплекса исследований, организацию платформы моделирования, а также студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ и СПбГПУ за участие в тестировании и предоставление согласия на использование полученных данных и экспериментальных результатов.

Список использованных источников

1. A. R. Jensen. Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences. Elsevier, 2006. 272 p.
2. L. D. Sheppard, P. A. Vernon. Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research//Personality and individual differences. 2008. Vol. 44 (3). P. 535-551.
3. A. R. Jensen. The importance of intraindividual variation in reaction time//Personality and individual Differences. 1992. Vol. 13 (8). P. 869-881.
4. A. R. Jensen. Process differences and individual differences in some cognitivetasks//Intelligence. 1987. Vol. 11. № 2. P. 107-136.
5. A. Welford. Choice reaction time: Basic concepts//Reaction times. 1980. P. 73-128.
6. W. E. Hick. On the rate of gain of information//Quarterly Journal of experimental psychology. 1952. Vol. 4. № 1. P. 11-26.
7. M. Brysbaert. Editorial QJEP classics revisited//Quarterly Journal of Experimental Psychology. 2016. Vol. 69. P. 1861-1863.
8. R. W. Proctor, D. W. Schneider. Hick's law for choice reaction time: A review//Quarterly Journal of Experimental Psychology. 2018. Vol. 71 (6). P. 1281-1299.
9. W. Liu, J. Gori, O. Rioul et al. How Relevant is Hick's Law for HCI?//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2020. P. 1-11.
10. J. Cao. Applying Hick's law to Web design. Free example wireframes. 2010. <https://www.uxpin.com/studio/blog/applying-hicks-law-to-web-design-free-examplewireframes>.
11. J. Sauro. Five HCI laws for user experience design. Measuring U. 2013. <http://www.measuringu.com/blog/hci-laws.php>.
12. R. Hyman. Stimulus information as a determinant of reaction time//Journal of Experimental Psychology. 1953. № 53. P. 188-196.
13. R. K. Jamieson, D. J. K. Mewhort. Applying an exemplar model to the serial reaction-time task: Anticipating from experience//Quarterly Journal of Experimental Psychology. 2009. Vol. 62. № 9. P. 1757-1783.
14. T. Wu, A. J. Dufford, L. J. Egan et al. Hick-Hyman law is mediated by the cognitive control network in the brain. Cerebral Cortex. 2018. Vol. 28. № 7. P. 2267-2282.
15. T. H. Rammsayer, O. Pahud, S. J. Troche. Decomposing the functional relationship between speed of information processing in the Hick paradigm and mental ability: A fixed-links modeling approach//Personality and individual differences. 2017. Vol. 118. P. 17-21.
16. C. Shannon, W. Weaver. A mathematical theory of communication//The Bell system technical journal. 1948. Vol. 27. № 3. P. 379-423.
17. G. E. Hawkins, S. D. Brown, M. Steyvers, E. J. Wagenmakers. An optimal adjustment procedure to minimize experiment time in decisions with multiple alternatives//Psychonomic bulletin & review. 2012. Vol. 19. № 2. P. 339-348.
18. J. Wagemans, J. H. Elder, M. Kubovy et al. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure-ground organization//Psychological bulletin. 2012. Vol. 138. № 6. P. 1172-1217.
19. J. Wagemans, J. Feldman, S. Gepshtein et al. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations//Psychological bulletin. 2012. Vol. 138. № 6. P. 1218.
20. P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement//Journal of Experimental Psychology. 1954. № 47. P. 381-391.
21. S. Tak, A. Toet, J. van Erp. The perception of visual uncertainty representation by non-experts//IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2013. № 20 (6). P. 935-943.
22. R. Finger, A. M. Bisantz. Utilizing graphical formats to convey uncertainty in a decision-making task//Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2002. Vol. 3. Issue 1. P. 1-25.
23. D. S. McNamara. Bringing cognitive science into education and back again: The value of interdisciplinary research//Cognitive Science. 2006. Vol. 30. P. 605-608.
24. J. Sweller, J. J. G. van Merriënboer, F. Paas. Cognitive architecture and instructional design//Educational Psychology Review. 1998. № 10 (3). P. 251-296.
25. E. Pollock, P. Chandler, J. Sweller. Assimilating complex information //Learning and instruction. 2002. № 12. P. 61-86.
26. J. Sweller. The redundancy principle in multimedia learning. The Cambridge handbook of multimedia learning. 2005. P. 159-168.
27. J. Sweller, P. Ayres, S. Kalyuga. Cognitive load theory. 2011. Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8126-4.
28. J. Sweller, J. J. G. van Merriënboer, F. Paas. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later//Educational Psychology Review. 2019. № 31 (2). P. 261-292.
29. M. T. H. Chi, R. Glaser, E. Rees. Expertise in problem solving//In R. Stenberg (Ed.). Advances in psychology of human intelligence. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1982. P. 7-75.
30. E. J. Pollock. Bachelor of Economics (Social Sciences) (Hons). Thesis submitted to the University of New South Wales in fulfilment of the conditions for the degree of Doctor of Philosophy. School of Education University of New South Wales. Australia. 2000. 399 p.
31. W. W. Wierwille, F. L. Eggemeier. Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment//Human Factor. 1993. Vol. 35. P. 263-281.
32. J. Kagan. Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo//Journal of abnormal psychology. 1966. Vol. 71. № 1. P. 17-24.
33. B. Gargallo. Basic variables in reflection-impulsivity: A training programme to increase reflectivity//European Journal of Psychology of Education. 1993. Vol. 8. № 2. P. 151-167.
34. И. Г. Скотникова. Когнитивно-стилевые характеристики познавательной деятельности в задачах с неопределенностью//Образование личности. 2018. № 2. С. 60-70.
35. И. Г. Скотникова. Психофизические характеристики зрительного различения и когнитивный стиль//Психологический журнал. 1990. Т. 11. № 1. С. 84-94.
36. М. А. Холодная. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. СПб.: Питер. 2004. 384 с.
37. Е. Е. Котова, А. Н. Печников, А. С. Писарев. Программный комплекс диагностики когнитивных параметров специалиста (ОнтоМАСТЕР-Диагностика). Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009615001. 2009.
38. N. A. Nisa, B. Setiyadi, H. Huzairin. The Comparative Study between Reflectivity and Impulsivity Cognitive Style in Using Learning Strategy in Reading and Reading Comprehension//U-JET. 2018. Vol. 7. № 3. P. 1-62.
39. S. L. Frank. Uncertainty reduction as a measure of cognitive load in sentence comprehension//Topics in cognitive science. 2013. Vol. 5. № 3. P. 475-494.
40. W. Boulila. A top-down approach for semantic segmentation of big remote sensing images//Earth Science Informatics. 2019. Vol. 12. № 3. P. 295-306.
41. Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддингс. Цифровая обработка изображений в среде MatLab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
42. Д. Эломон. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера. 2004. 368 с.
43. D. Y. Tsai, Y. Lee, E. Matsuura. Information entropy measure for evaluation of image quality//Journal of digital imaging. 2008. Vol. 21. № 3. P. 338-347.
44. А. Н. Колмогоров. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука. 1987. 304 с.
45. R. Larsen. Mastering SVG. Packt Publishing. 2018. 312 p.
46. M. Bakaev, E. Goltsova, V. Khvorostov, O. Razumnikova. Data Compression Algorithms in Analysis of UI Layouts Visual Complexity//International Andrei Ershov Memorial Conference on Perspectives of System Informatics. Springer. Cham. 2019. P. 167-184.
47. P. Zhang, W. Zhou, L. Wu, H. Li. SOM: Semantic obviousness metric for image quality assessment//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. P. 2394-2402.
48. Z. Chen, T. He. Learning based facial image compression with semantic fidelity metric//Neurocomputing. 2019. Vol. 338. P. 16-25.
49. Е. Е. Котова, А. С. Писарев. Программа интеллектуального анализа продуктивности решения когнитивных задач в электронной среде (Эксперт-Аналитик ART). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667345 от 22.12.2020. Заявка № 2020665717 от 03.12.2020.
50. H. Zenil, N. A. Kiani, J. Tegnér. A review of graph and network complexity from an algorithmic information perspective//Entropy. 2018. Vol. 20. № 8. P. 1-15.
51. T. J. McCabe. A complexity measure//IEEE Transactions on software Engineering. 1976. № P. 308-320.

References

1. A. R. Jensen. Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences. Elsevier, 2006. 272 p.
2. L. D. Sheppard, P. A. Vernon. Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research//Personality and individual differences. 2008. Vol. 44 (3). P. 535-551.
3. A. R. Jensen. The importance of intraindividual variation in reaction time//Personality and individual Differences. 1992. Vol. 13 (8). P. 869-881.
4. A. R. Jensen. Process differences and individual differences in some cognitivetasks//Intelligence. 1987. Vol. 11. № 2. P. 107-136.
5. A. Welford. Choice reaction time: Basic concepts//Reaction times. 1980. P. 73-128.
6. W. E. Hick. On the rate of gain of information//Quarterly Journal of experimental psychology. 1952. Vol. 4. № 1. P. 11-26.
7. M. Brysbaert. Editorial QJEP classics revisited//Quarterly Journal of Experimental Psychology. 2016. Vol. 69. P. 1861-1863.
8. R. W. Proctor, D. W. Schneider. Hick's law for choice reaction time: A review//Quarterly Journal of Experimental Psychology. 2018. Vol. 71 (6). P. 1281-1299.
9. W. Liu, J. Gori, O. Rioul et al. How Relevant is Hick's Law for HCI?//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2020. P. 1-11.
10. J. Cao. Applying Hick's law to Web design. Free example wireframes. 2010. <https://www.uxpin.com/studio/blog/applying-hicks-law-to-web-design-free-examplewireframes>.

11. J. Sauro. Five HCI laws for user experience design. *Measuring U*. 2013. <http://www.measuringu.com/blog/hci-laws.php>.
12. R. Hyman. Stimulus information as a determinant of reaction time//*Journal of Experimental Psychology*. 1953. № 53. P. 188-196.
13. R. K. Jamieson, D. J. K. Mewhort. Applying an exemplar model to the serial reaction-time task: Anticipating from experience//*Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2009. Vol. 62. № 9. P. 1757-1783.
14. T. Wu, A. J. Dufford, L. J. Egan et al. Hick-Hyman law is mediated by the cognitive control network in the brain. *Cerebral Cortex*. 2018. Vol. 28. № 7. P. 2267-2282.
15. T. H. Rammsayer, O. Pahud, S. J. Troche. Decomposing the functional relationship between speed of information processing in the Hick paradigm and mental ability: A fixed-links modeling approach//*Personality and individual differences*. 2017. Vol. 118. P. 17-21.
16. C. Shannon, W. Weaver. A mathematical theory of communication//*The Bell system technical journal*. 1948. Vol. 27. № 3. P. 379-423.
17. G. E. Hawkins, S. D. Brown, M. Steyvers, E. J. Wagenmakers. An optimal adjustment procedure to minimize experiment time in decisions with multiple alternatives//*Psychonomic bulletin & review*. 2012. Vol. 19. № 2. P. 339-348.
18. J. Wagemans, J. H. Elder, M. Kubovy et al. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure-ground organization//*Psychological bulletin*. 2012. Vol. 138. № 6. P. 1172-1217.
19. J. Wagemans, J. Feldman, S. Gepshtein et al. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations//*Psychological bulletin*. 2012. Vol. 138. № 6. P. 1218.
20. P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement//*Journal of Experimental Psychology*. 1954. № 47. P. 381-391.
21. S. Tak, A. Toet, J. van Erp. The perception of visual uncertainty representation by non-experts//*IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2013. № 20 (6). P. 935-943.
22. R. Finger, A. M. Bisantz. Utilizing graphical formats to convey uncertainty in a decision-making task//*Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2002. Vol. 3. Issue 1. P. 1-25.
23. D. S. McNamara. Bringing cognitive science into education and back again: The value of interdisciplinary research//*Cognitive Science*. 2006. Vol. 30. P. 605-608.
24. J. Sweller, J. J. G. van Merriënboer, F. Paas. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later//*Educational Psychology Review*. 1998. № 10 (3). P. 251-296.
25. E. Pollock, P. Chandler, J. Sweller. Assimilating complex information // *Learning and instruction*. 2002. № 12. P. 61-86.
26. J. Sweller. The redundancy principle in multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*. 2005. P. 159-168.
27. J. Sweller, P. Ayres, S. Kalyuga. *Cognitive load theory*. 2011. Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8126-4.
28. J. Sweller, J. J. G. van Merriënboer, F. Paas. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later//*Educational Psychology Review*. 2019. № 31 (2). P. 261-292.
29. M. T. H. Chi, R. Glaser, E. Rees. Expertise in problem solving//In R. Stenberg (Ed.). *Advances in psychology of human intelligence*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1982. P. 7-75.
30. E. J. Pollock. Bachelor of Economics (Social Sciences) (Hons). Thesis submitted to the University of New South Wales in fulfilment of the conditions for the degree of Doctor of Philosophy. School of Education University of New South Wales. Australia. 2000. 399 p.
31. W. W. Wierwille, F. L. Eggemeier. Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment//*Human Factor*. 1993. Vol. 35. P. 263-281.
32. J. Kagan. Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo//*Journal of abnormal psychology*. 1966. Vol. 71. № 1. P. 17-24.
33. B. Gargallo. Basic variables in reflection-impulsivity: A training programme to increase reflectivity//*European Journal of Psychology of Education*. 1993. Vol. 8. № 2. P. 151-167.
34. I. G. Skotnikova. Kognitivno-stilevye karakteristiki poznavatel'noj dejatel'nosti v zadachah s neopredelennost'ju//*Obrazovanie lichnosti*. 2018. № 2. S. 60-70. (In Russian.)
35. I. G. Skotnikova. Psihofizicheskie karakteristiki zritel'nogo razlichenija i kognitivnyj stil'//*Psihologicheskij zhurnal*. 1990. T. 11. № 1. S. 84-94. (In Russian.)
36. M. A. Holodnaja. Kognitivnye stili. O prirode individual'nogo uma. SPb.: Piter, 2004. 384 s. (In Russian.)
37. E. E. Kotova, A. N. Pechnikov, A. S. Pisarev. Programmyj kompleks diagnostiki kognitivnyh parametrov specialista (OntoMASTER-Diagnostika). Svid-vo o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2009615001. 2009. (In Russian.)
38. N. A. Nisa, B. Setiyadi, H. Huzairin. The Comparative Study between Reflectivity and Impulsivity Cognitive Style in Using Learning Strategy in Reading and Reading Comprehension//*U-JET*. 2018. Vol. 7. № 3. P. 1-62.
39. S. L. Frank. Uncertainty reduction as a measure of cognitive load in sentence comprehension//*Topics in cognitive science*. 2013. Vol. 5. № 3. P. 475-494.
40. W. Boulila. A top-down approach for semantic segmentation of big remote sensing images//*Earth Science Informatics*. 2019. Vol. 12. № 3. P. 295-306.
41. R. Gonsales, R. Vuds, S. Jeddins. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v srede MatLab. M.: Tehnosfera, 2006. 616 s. (In Russian.)
42. D. Sjelomon. Szhatie dannyh, izobrazhenij i zvuka. M.: Tehnosfera. 2004. 368 s. (In Russian.)
43. D. Y. Tsai, Y. Lee, E. Matsuyama. Information entropy measure for evaluation of image quality//*Journal of digital imaging*. 2008. Vol. 21. № 3. P. 338-347.
44. A. N. Kolmogorov. Teorija informacii i teorija algoritmov. M.: Nauka, 1987. 304 s. (In Russian.)
45. R. Larsen. *Mastering SVG*. Packt Publishing. 2018. 312 p.
46. M. Bakaev, E. Goltsova, V. Khvorostov, O. Razumnikova. Data Compression Algorithms in Analysis of UI Layouts Visual Complexity//*International Andrei Ershov Memorial Conference on Perspectives of System Informatics*. Springer. Cham. 2019. P. 167-184.
47. P. Zhang, W. Zhou, L. Wu, H. Li. SOM: Semantic obviousness metric for image quality assessment//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015. P. 2394-2402.
48. Z. Chen, T. He. Learning based facial image compression with semantic fidelity metric//*Neurocomputing*. 2019. Vol. 338. P. 16-25.
49. E. E. Kotova, A. S. Pisarev. Programma intellektual'nogo analiza produktivnosti reshenija kognitivnyh zadach v jelektronnoj srede (Jekspert-Analitik ART). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2020667345 ot 22.12.2020. Zajavka № 2020665717 ot 03.12.2020. (In Russian.)
50. H. Zenil, N. A. Kiani, J. Tegnér. A review of graph and network complexity from an algorithmic information perspective//*Entropy*. 2018. Vol. 20. № 8. P. 1-15.
51. T. J. McCabe. A complexity measure//*IEEE Transactions on software Engineering*. 1976. № P. 308-320.