

Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования

Т. В. Зыкова, А. А. Кытманов, М. В. Носков*, Е. А. Халтурин

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Адрес: 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79

* mvnoskov@yandex.ru

Аннотация

Работа посвящена разработке подхода к анализу учебных планов образовательных программ высшего образования в условиях действующих федеральных государственных образовательных стандартов с точки зрения достижения заявленных образовательных результатов в виде набора компетенций. Данный подход может оказаться полезным для создания автоматизированных средств оценки качества и сравнительного анализа образовательных программ. На основе компетентностного подхода предложена модель представления учебного плана в виде простого взвешенного неориентированного графа. Предложен подход к визуализации графового представления учебного плана на основе применения силового алгоритма визуализации, обеспечивающего достижение максимальной наглядности. Предложен подход к определению междисциплинарных связей образовательных единиц учебного плана через на основе их трудоемкости и формируемым компетенциям. Полученное визуальное представление междисциплинарных связей помогает лучше понять структуру учебного плана, выявить дисциплины с максимальным числом междисциплинарных связей, а также произвести декомпозицию плана на кластеры наиболее связанных между собой дисциплин. Предложены варианты интегральных характеристик графовых представлений учебных планов, на основе которых можно проводить их оценку, а также сравнительный анализ соответствующих образовательных программ. В качестве примеров рассмотрены учебные планы подготовки бакалавров по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.03 «Прикладная информатика», реализуемых в институте космических и информационных технологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Ключевые слова: образовательная программа, учебный план, компетентностный подход, междисциплинарные связи, компетенции, ИТ-образование, графовая модель, силовой алгоритм визуализации графа, интегральные характеристики

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-28-00413 «Цифровая образовательная история и ее применение в системах поддержки успешности обучения»).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования / Т. В. Зыкова [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 1. С. 104-116. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104-116>

© Зыкова Т. В., Кытманов А. А., Носков М. В., Халтурин Е. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Application of a Force-Directed Graph Drawing Algorithm for the Analysis of Curricula of Educational Programs of Higher Education

T. V. Zykova, A. A. Kytmanov, M. V. Noskov*, E. A. Khalturin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Address: 79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation

* mvnoskov@yandex.ru

Abstract

The work is devoted to the development of an approach to the analysis of curricula of educational programs of higher education in the context of the current federal state educational standards in terms of achieving the declared learning outcomes formulated in the form of a set of competencies. This approach may prove useful for developing automated tools for assessing the quality of educational programs, as well as their comparative analysis. We propose a model for representing the curriculum in the form of a simple weighted undirected graph based on the competence-based approach. We propose an approach to the visualization of the graph representation of the curriculum based on the use of a force-directed graph drawing algorithm, which ensures achieving maximum visibility. We propose an approach to determine the interdisciplinary links of educational units of the curriculum based on their total number of credits and the competencies they are involved in. The resulting visual representation of interdisciplinary connections helps to better understand the structure of the curriculum, identify disciplines with the maximum number of interdisciplinary connections, and also decompose the plan into clusters of the most interconnected disciplines. We propose options for defining integral characteristics of graph representations of curricula, based on which the curricula can be evaluated, as well as a comparative analysis of the corresponding educational programs can be performed. As examples, we consider the curricula for the of bachelor programs majoring in 09.03.01 "Computer Science and Computer Engineering" and 09.03.03 "Applied Computer Science", implemented at the Institute of Space and Information Technology of Siberian Federal University.

Keywords: educational program, curriculum, competence-based approach, interdisciplinary connections, competencies, IT education, graph model, force-directed graph drawing algorithm, integral characteristics

Funding: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Scientific Foundation (project 22-28-00413 "Digital Educational History and Its Application in the Systems of Support of Learning Success").

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Zykova T.V., Kytmanov A.A., Noskov M.V., Khalturin E.A. Application of a Force-Directed Graph Drawing Algorithm for the Analysis of Curricula of Educational Programs of Higher Education. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(1):104-116. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104-116>



Введение

Последние два десятилетия наблюдается взрывной рост технологий, связанных с цифровизацией различных процессов и сфер человеческой жизни. Профессии меняются, некоторые исчезают, новые появляются на стыке различных профессиональных областей [1], особенно актуален данный процесс в сфере информационных технологий. Активный толчок к развитию получили цифровые образовательные платформы, создание которых было инициировано различными представителями рынка: межвузовскими ассоциациями (Coursera, EdX), коммерческими структурами (SkillBox, SkyPro, Нетология и др.), государством (Открытое образование), коллективами единомышленников (Khan Academy) и др.

Образовательные институты признают быстрое развитие общества и вытекающее из этого требование реагировать на новые обстоятельства, но, к сожалению, им не всегда это удается [2]. Тем не менее, вузы должны успешно справляться с задачей подготовки инженерных кадров «с новыми профессионально значимыми функциями, новыми компетенциями, новыми целями и задачами» [3]. В нашей стране государственные образовательные стандарты претерпели изменения (ГОС 2 поколения, ФГОС 3, ФГОС ВО 3++) [4, 5]. Одной из фундаментальных особенностей этих изменений был переход от жесткого предписания дисциплин, реализуемых в образовательных программах к четким формулировкам образовательных результатов программ в виде списка компетенций.

В нашем исследовании мы предполагаем, что содержание классических дисциплин, особенно традиционно читаемых в базовых блоках как правило на первых двух курсах образовательных программ (ОП) (например, традиционные курсы по математике: математический анализ, линейная алгебра, аналитическая геометрия, дискретная математика, математическая логика, теория вероятностей, математическая статистика, дифференциальные уравнения и др.) зависит, в основном, только от общей трудоемкости дисциплины (связанной с набором осваиваемых тем), и не зависит от конкретного вуза, подразделения или преподавателя, реализующего дисциплину. В этом случае основным документом, характеризующим ОП, является ее учебный план (УП). Этот документ определяет связи наполнения ОП (дисциплин, практик, аттестации) с образовательными результатами, сформулированными в виде компетенций.

Разработка УП, обычно определяемая в рамках разработки ОП, всегда была и остается одной из самых ответственных задач, поскольку, фактически, УП является ядром дизайна ОП. Создание сбалансированного УП также является весьма сложной

задачей, в частности из-за различных требований (например, унификация нагрузки на младших курсах, пожелания работодателей и т.д.). Кроме этого, на саму образовательную систему влияют различные политические и социальные факторы. Одним из ярких примеров является сейчас движение в сторону отказа от Болонской системы. Среди основных трудностей можно отметить требования ФГОС, не всегда органично вписывающиеся в особенности учебного процесса образовательной организации, необходимость корректировки и модернизации ОП в соответствии с изменяющимися требованиями рынка труда, уровень подготовки студентов и готовность ППС модернизировать курсы в соответствии с изменяющимися запросами не только на бумаге, но и по сути.

Изменение УП, методики обучения, оценки или студенческой практики будет иметь эффект только при условии изменения других элементов, входящих в образовательную систему. Акцент на подходах, основанных на профессиональных навыках, был инициирован ЮНЕСКО в середине 90-х годов 20 века Ж. Делором¹. За ним последовал проект Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) «Определение в выбор компетенций» (DeSeCo), который затем привел к Европейской эталонной системе (ERF) ключевых компетенций². В 2016 г. Европейская комиссия обозначила новую повестку, в которой подчеркивается еще больший акцент на профессиональных навыках, как путь к трудоустройству и процветанию³ [6-8]. Что касается нашей страны, то компетентный подход, по поводу которого не утихают споры и по сей день, стал неотъемлемой реальностью для большинства отечественных университетов [9]. Учитывая изменения требований к компетенциям и постоянным переходам на новые стандарты, необходимо отслеживать эти процессы, а значит иметь механизмы отслеживания формирующихся УП [10, 11].

Наконец, в настоящее время реализуется проект ОЭСР «Будущее образования и навыков: Образование 2030» (Future of Education and Skills: Education 2030), целью которого является разработка общедоступной системы обучения, основанной на модели образования, а также компетентным подходе⁴. Проект «Образование 2030» направлен как на школьное образование, так и общее, и профессиональное. Актуальность проекта состоит в том, чтобы исследовать и построить прогноз возможного будущего образования в мире, т.е. тех, кто в настоящий момент обучается в начальной и средней школе, а к 2030 году будет представлять основную часть населения, вступившую в рабочий возраст. Проект состоит из двух основных направлений. Во-первых, разработка концептуальной рамки обучения, которая бы соответствовала 2030 году. Это связано с тем, что ОЭСР понимают, что на международном уровне

¹ Delors J. Learning: the treasure within; report to UNESCO of the International Commission on Education for the Twenty-first Century (highlights). Paris : UNESCO, 1996. 46 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000109590> (дата обращения: 10.11.2022).

² Recommendation of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 on key competences for lifelong learning (2006/962/EC) [Электронный ресурс] // Official Journal of the European Union. 13.12.2006. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:394:0010:0018:en:PDF> (дата обращения: 10.11.2022).

³ A new skills Agenda for Europe. Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels : European Commission, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0381> (дата обращения: 10.11.2022).

⁴ Howells K. The future of education and skills: education 2030: the future we want. Paris : OECD, 2018 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.oecd.org/education/2030/E2030%20Position%20Paper%20\(05.04.2018\).pdf](https://www.oecd.org/education/2030/E2030%20Position%20Paper%20(05.04.2018).pdf) (дата обращения: 10.11.2022); Rychen D. E2030 conceptual framework: key competencies for 2030 (DeSeCo 2.0). Paris : OECD, 2016. 22 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oecd.org/education/2030/E2030-CONCEPTUAL-FRAMEWORK-KEY-COMPETENCIES-FOR-2030.pdf> (дата обращения: 10.11.2022).



понятие «компетенция» имеет различные характеристики и разновидности. Обсуждение позволило бы странам, участникам проекта, определить и выработать более четкие образовательные цели, что в свою очередь может иметь решающую роль для развития образования в целом. Во-вторых, международный сравнительный анализ УП, создание базы знаний для разработки и модификации существующих УП подготовки будущих высококвалифицированных специалистов в различных областях.

Говоря об ИТ-образовании, необходимо отметить документ Computing Curricula 2020 (CC2020), разработанный Ассоциацией вычислительной техники (англ. Association for Computing Machinery, ACM) – старейшей и наиболее крупной международной организацией в области компьютерных наук. Данный документ определяет развитие образования в сфере информационных технологий. В работе [12] рассмотрены положения CC2020, регламентирующие архитектуру ОП, их методологию на основе компетентностного подхода и состав ожидаемых направлений развития ОП в области ИТ-образования.

Исследование [13] показывает, что обучение и оценка на основе компетенций позволяют группировать не только способности, навыки и отношения, но и мотивацию, которая развивается на протяжении всего процесса обучения и воспитания. О качестве ОП могут говорить такие показатели как ее востребованность среди абитуриентов (конкурс на место), динамика контингента на протяжении обучения (в том числе добровольная исходящая и входящая миграция контингента), процент трудоустройства выпускников, динамика их карьерного роста и др. Анализ источников показывает, что существует несколько точек зрения на оценку ОП. Выделяют оценку на основе содержания, компетенций, а также достигнутых результатов [14]. Тем не менее, различным заинтересованным сторонам образовательного процесса, включая руководство вуза и его подразделения, реализующего ее, хотелось бы иметь возможность оценить качество ОП, ее сбалансированность и соответствие заявленным образовательным результатам по ее основным документам, в частности, учебному плану (УП). Одним из подходов поиска связей между реализуемыми компетенциями и учебными компонентами УП является декомпозиция первых и вторых на атомарные составляющие и составление таблиц соответствия между осваиваемыми материалами и формируемой составляющей компетенции. Однако этот подход требует больших трудозатрат, более того основывающихся на экспертном мнении. Другим подходом к решению данной задачи, основанным на больших данных, является анализ УП подобных ОП (с одинаковым кодом и ФГОС) в разных вузах или их подразделениях.

Первым шагом здесь является поиск таких интегральных характеристик УП (инвариантов), которые могли бы каким-либо образом свидетельствовать о качестве УП, характеризовать его с положительной или отрицательной стороны. Например, в работе [15] подробно проанализированы УП обучения бакалавров по направлению 230400.62 «Информационные системы и технологии» в рамках ФГОС третьего поколения. Подробно рассматриваются количественные характеристики компетенций на основе сравнительного анализа учебных планов, предлагаются рекомендации разработчикам основных образовательных программ. В работе [16] проведен анализ

корреляций дисциплин учебного плана на основе коэффициентов ранговой корреляции Спирмана для эффективного построения учебного плана. В работе [17] представлена концепция, структура и особенности самостоятельно установленного образовательного стандарта Университета ИТМО, разработанного на основе ФГОС ВО, профессиональных и международных стандартов инженерного образования. Тем не менее вопрос, касающийся анализа УП не закрыт.

Заметим, что с каждым новым поколением ФГОС универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции (УК, ОПК, ПК) обретают все более четкое значение. Это достигается посредством описания их с помощью индикаторов, связи с трудовыми функциями профессиональных стандартов и пр.

В данной работе мы попытались описать подход к поиску характеристик УП и изучению их связи с внешними оценками качества ОП, разработки программных алгоритмов, визуализирующих связи дисциплин, учитывая общую трудоемкость, а также реализуемые компетенции.

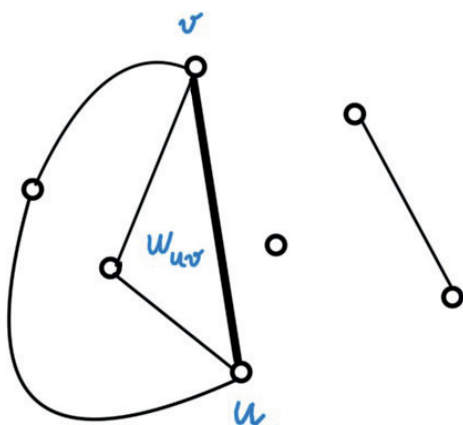
Представление учебного плана в виде графа

Рассмотрим УП. Каждый УП формирует множество универсальных (общекультурных) компетенций УК, общепрофессиональных компетенций ОПК, а также профессиональных компетенций ПК. Каждая дисциплина, реализуемая в УП, может участвовать в формировании одной или нескольких компетенций. При этом, на уровне вуза или его подразделений при разработке ОП могут вводиться дополнительные требования и ограничения, способствующие формированию более сбалансированного (по мнению экспертов) УП. Примерами таких ограничений могут быть требование о том, что дисциплина не может участвовать в формировании более трех компетенций без соответствующего обоснования или требование о том что связанные дисциплины (знание дисциплины А требуется для освоения дисциплины В) обязаны участвовать в формировании одной и той же компетенции.

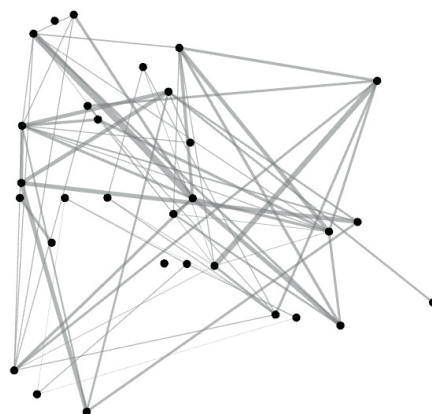
Представим УП в виде неориентированного графа $G = (V, E)$, где V — множество вершин, определяемое списком дисциплин, заложенных в УП, а $E \subset \{v, u\}: v, u \in V$ — множество ребер, определяющее пары неупорядоченных вершин графа G . Обозначим за N общее количество дисциплин, реализованных в УП. Каждой дисциплине – вершине графа v_k будет соответствовать множество компетенций $\{K\}_{v_k}$, заложенных в данную дисциплину. Под ребром $\{v, u\}$ будем понимать *междисциплинарную связь*, определяемую пересечением множеств $\{K\}_v$ и $\{K\}_u$. Ребро существует, если $\{K\}_v \cap \{K\}_u \neq \emptyset$. Если две дисциплины не участвуют в формировании хотя бы одной одинаковой компетенции, то ребро графа G не существует.

Поскольку в УП на реализацию различных дисциплин закладывается различное количество часов и зачетных единиц (зе), то определим вес w_{vu} для ребра $\{v, u\}$. Обозначим через ze_v количество зачетных единиц, отведенное некоторой дисциплине УП, соответствующее вершине графа v . Пусть $\sum ze$ – это общее количество зачетных единиц, отведенное на реализацию УП, тогда удельный вес зачетной единицы можно вычислить как





Р и с. 1. Граф
F i g. 1. Graph G



Р и с. 2. УП в виде графа
F i g. 2. Curriculum as a graph

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.
Source: Hereinafter in this article all figures were made by the authors.

$УДВ_{зе} = \frac{N}{\sum зе}$, если предположить равнозначность зачетных единиц. Таким образом, определим вес ребра $\{v, u\}$ как

$$w_{vu} = \frac{1}{2 УДВ_{зе}} (ze_v + ze_u) |\{K\}_v \cap \{K\}_u|,$$

где, фактически, вес ребра определяется как среднее арифметическое зачетных единиц, соответствующих вершинам u и v , учитывая $УДВ_{зе}$, а $|\{K\}_v \cap \{K\}_u|$ — мощность множества пересечения количества компетенций, заложенных в дисциплины, соответствующие вершинам графа u и v .

Фактически, вес ребра выражает собой меру относительной связи дисциплин посредством участия в формировании подобных образовательных результатов. Наша цель — определить на основе вводимых понятий и их величин такие интегральные характеристики УП, которые могли бы свидетельствовать о связи структуры и дизайна УП с его качеством в смысле достижения обучающимися заявленных образовательных результатов и пр.

Для УП одним из информативных объектов будет матрица смежности взвешанного неориентированного графа G , которая будет симметрична относительно главной диагонали. Элемент матрицы вес w_{vu} будет отличен от нуля, если существует ребро $\{v, u\}$ между вершинами v, u .

Другой объект — это сам граф G , определяемый УП (см. рис. 1). Данный граф будет является простым, так как не будет содержать петель и кратных ребер. Степень вершины $deg(v_i)$ графа G определяется количеством ребер графа G , инцидентных вершине v_i , то есть данный параметр будет показывать количество междисциплинарных связей дисциплины, соответствующей вершине v_i . Можно обозначить через $\Delta(G)$ — максимальную степень вершин графа G , а через $\delta(G)$ — минимальную. В нашем случае для УП $\delta(G) = 0$, так как в каждом УП есть дисциплины, которые не связаны ни с одной другой по реализуемым компетенциям. Поскольку УП уровня бакалавриата содержит, как правило, не более 60 дисциплин, то визуальное представление такого

плана в виде графа G перестает быть наглядно-информативным (см. рис. 2). Здесь уже сложно различить междисциплинарные связи и сделать какие-либо выводы о структуре УП в целом.

Существует несколько подходов к визуализации неориентированных графов⁵. Широкое применение при визуализации информации получили методы, основанные на физических аналогиях, то есть на применении "направленных сил" (force-directed algorithms). Данные алгоритмы раскладки графа на плоскости основаны на представлении вершин как отталкивающихся частиц, а ребер как пружин [18, 19]. Под действием сил, пружины приводят систему в движение, происходит деформация и меняется расположение вершин графа. Алгоритм завершается, когда система достигает минимального энергетического состояния. Важно отметить, что такие алгоритмы вычисляют макет графа, используя информацию, содержащуюся в структуре только самого графа. Изображения, полученные на основе таких алгоритмов, как правило, демонстрируют некоторую симметрию, создают макеты без пересечений для плоских графов и выглядят эстетически привлекательными.

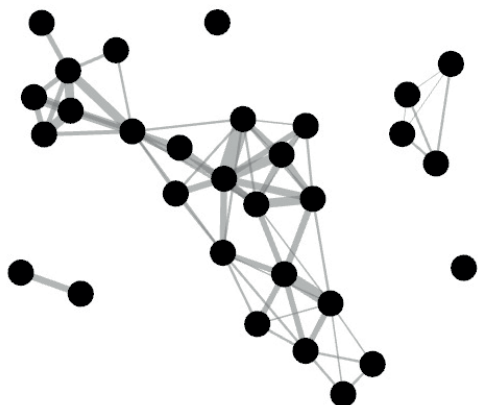
Социальные, технологические и информационные системы часто можно описать в терминах безмасштабных сетей, то есть такими, в которых степени вершин распределены по степенному закону [20]. Такие сети сочетают в себе организацию (заложенные закономерности) и случайность. Алгоритм "Force Atlas" [21] был разработан для визуализации безмасштабных сетей. Сложность составляет $O(N^2)$, что позволяет обработать графы с числом вершин от 1 до 10 000. При обработке учитывается вес ребра графа. При проектировании "Force Atlas" был сделан акцент на качестве визуализации, что делают раскладку графа, получающуюся на выходе максимально наглядной. Данный алгоритм показывает хорошие результаты, когда входной граф является простым, связным, неориентированным. Алгоритм "Force Atlas" также основан на модели отталкивающихся

⁵ Cruz I. F., Tamassia R. How to visualize a graph: Specification and Algorithms. Technical report Tufts University, 1994 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cs.brown.edu/people/rt/gd-tutorial.html> (дата обращения: 10.11.2022).



частиц (вершин), соединенных пружинами (ребра). Сила притяжения $F_a = \frac{d}{k}$, а сила отталкивания $F_r = -\frac{k^2}{d}$, здесь d – расстояние между вершинами. Коэффициент k определяется в зависимости от размеров графа.

Если применить к модели УП, представленной на рисунке 2 алгоритм "Force Atlas", то визуализация становится более информативной (см. рис. 3).



Р и с. 3. Результат применения алгоритма Force Atlas
F i g. 3. The result of applying the Force Atlas algorithm

Интегральные характеристики учебного плана

Рассмотрим показатели графа по которым можно характеризовать УП и определить их в качестве интегральных характеристик УП.

Связные компоненты. Граф будет являться связным (односвязным), если для любых вершин этого графа u, v существует путь из u в v . Рассматриваемый граф G , представляющий УП, никогда не будет являться связным, так как известно, что изначально на этапе формирования УП существуют дисциплины, которые не коррелируют ни с какой из других дисциплин плана по реализуемым компетенциям, например, «Безопасность жизнедеятельности», «Основы профилактики коррупции». Как следствие отсутствуют междисциплинарные связи – ребра графа G . Для графа G можно определить количество компонент связности. Это количество частей графа (подграф), являющихся связными. Также можно определить компоненту связности графа G – максимальный связный подграф графа G , то есть такой подграф $G(U)$, порожденный множеством $U \subseteq V(G)$ вершин, в котором для любой пары вершин $u, v \in U$ в графе G существует (u, v) -цепь и для любой пары вершин $u \in U, w \notin U$ не существует (u, w) -цепи. Для графа G , представленного на рисунке 3, видно, что количество связных компонент будет равно 5.

Для любого множества, например, социальной или какой-либо другой сети представленной в виде графа, из тесной связности будет следовать более высокая скорость передачи информации. Так и для УП, небольшое количество связных компонент соответствующего графа G , будет свидетельствовать о наличии тесных междисциплинарных связей, о знании приемственности дисциплин, заложенной в УП при его разработке.

Диаметр. Это среднее расстояние по всевозможным парам узлов графа G . Связанные напрямую вершины графа G , имеют расстояние 1. Диаметр – максимальное расстояние по всевозможным парам вершин графа, то есть насколько удалены друг от друга две максимально удаленных вершины графа G . В алгоритме, описанном в [22] можно рассчитать как часто вершина графа лежит на кратчайшем пути между некоторыми двумя вершинами графа, а также среднюю дистанцию от выбранной начальной вершины до всех остальных вершин, максимальную дистанцию от выбранной начальной вершины до наиболее удаленной вершины графа. Для графа G , представленного на рисунке 3, диаметр графа будет равен 5. Этот показатель, наравне с компонентами связности, позволяет сделать выводы о приемственности дисциплин УП и свидетельствует о "длине" междисциплинарных связей, заложенных на основе компетенций.

Плотность. Эта метрика показывает насколько близок граф к полному. Полный граф имеет все возможные ребра и плотность равную 1. Плотность графа – это отношение реального числа связей в графе к максимально возможному в неориентированном графе с тем же числом вершин $\frac{N(N-1)}{2}$, где N – число вершин графа.

Граф G имеет 30 вершин и 66 ребер. Таким образом, если бы он был полным, то имел бы 435 ребер, плотность графа G равна 0,152.

Безусловно данный параметр для УП не обладает высокой информативностью, но может быть полезным для сравнения различных УП, ориентируясь на междисциплинарные связи.

Средняя степень. Если L – число ребер графа G , то средняя степень вершины можно определить по формуле

$$\overline{deg} = \frac{\sum_{i=1}^N deg(v_i)}{N} = \frac{2L}{N}.$$

Для рассматриваемого графа G средняя степень $\overline{deg} = 4,4$. Этот показатель говорит о количестве компетенций, приходящемся в среднем на одну дисциплину УП. Графы с невысокой средней степенью вершин являются разреженными. Граф, соответствующий УП, не должен являться разреженным. В этом случае можно говорить об отсутствии междисциплинарных связей.

Средняя взвешенная степень. Можно вычислить степень каждой вершины, учитывая вес ребер, инцидентных данной вершине,

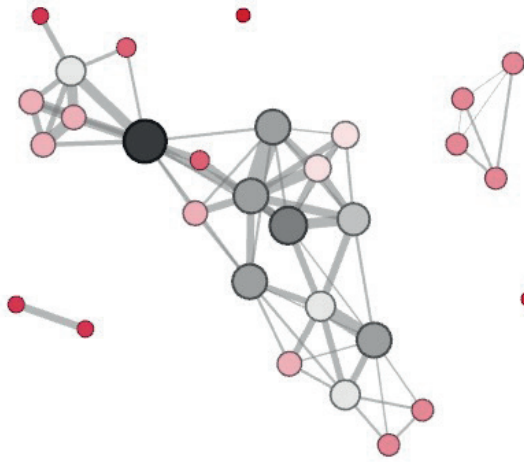
$$deg(v_i)_{w_i} = \sum_{j=1}^{deg(v_i)} w_{ij}.$$

Тогда средняя взвешенная степень определится как сумма взвешенных степеней по всему графу деленная на общий вес ребер графа.

Для рассматриваемого графа G этот параметр будет равен 82,55. Данную характеристику можно применять для сравнительного анализа различных УП.

Средний коэффициент кластеризации. Кластеризация является важным свойством различных сетей, в большинстве реальных сетей узлы имеют тенденцию создавать тесно связанные группы, характеризующиеся относительно высокой плотностью связей. Для измерения кластеризации применяют коэффициент кластеризации, который является действительным числом между нулем (отсутствие кластеризации) и единицей, когда сеть состоит из





Р и с. 4. Результат ранжирования вершин по степеням
F i g. 4. The result of ranking vertices by degrees

непересекающихся клик (подмножество вершин неориентированного графа, любые две из которых соединены ребром \sim полноте графа). То есть это означает, что когда коэффициент кластеризации высокий граф плотно сгруппирован вокруг нескольких узлов, а когда низкий – связи в графе относительно равномерно распределены среди всех узлов. Кластеризация в графе может быть проверена несколькими способами. Общий способ: вычисление количества треугольников, вложенных в граф, от общего возможного числа треугольников. Существуют два способа вычисления коэффициента кластеризации графа [23, 24].

Для рассматриваемого графа G средний коэффициент кластеризации составляет 0,804. Для УП, представленного в виде графа, это будет означать, что граф плотно сгруппирован вокруг нескольких вершин, что в свою очередь будет свидетельствовать о том, что в УП существуют несколько дисциплин, которые обладают высоким количеством междисциплинарных связей с другими дисциплинами.

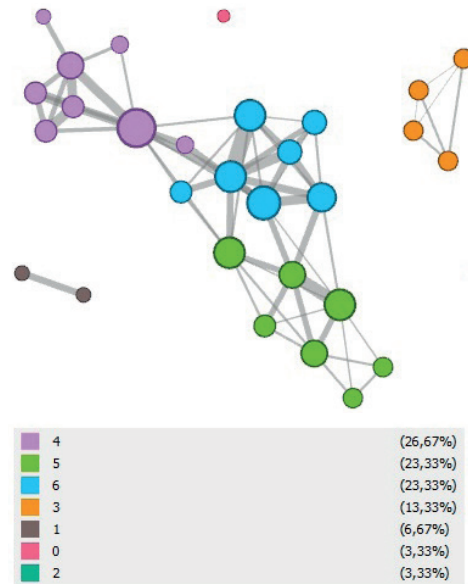
Модулярность. Понятие модуль графа является обобщением понятия компонент связности. $M \subseteq V$ является модулем графа G , если: 1) вершины M нельзя отличить по вершине в $V \setminus M$, то есть $\forall u, v \in M, \forall x \in V \setminus M$ либо x смежна с u , и с v , или x не смежна как с u , так и с v ; 2) вершины M имеют тот же набор внешних соседей, то есть $\forall u, v \in M, N(u) \setminus M = N(v) \setminus M$. В отличие от компонент связности, модули графа могут быть «вложенными» — один модуль может быть собственным подмножеством другого. При этом сохраняется свойство компонент связности, заключающееся в том, что компоненты одного модуля обладают каким-либо свойством, не зависящим от других вершин графа.

Модульность — это скалярная величина в диапазоне $[-1, 1]$, которая измеряет плотность связей внутри модулей по сравнению со связями между модулями. В случае взвешенных графов модулярность определяется как [25]:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[w_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j),$$

где w_{ij} – вес ребра, между v_i и v_j вершинами графа, $k_i = \sum_j w_{ij}$ – сумма весов ребер, присоединенных к v_i вершине, c_i – это модуль, к которому присваивается v_i вершина, δ – это функция, $\delta(s, t) = 1$, если $s = t$, $\delta(s, t) = 0$, если $s \neq t$, $m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} w_{ij}$.

Для графа G , представленного на рисунке 3, $Q = 0,525$, говорит о тесных связях между модулями внутри самого графа. Здесь можно выделить 7 модулей (см. рис. 5).



Р и с. 5. Выделение модулей в графе G
F i g. 5. Module selection in the graph G

В результате применения к графу, представляющему УП, силового алгоритма "Force Atlas", а также ранжирования вершин по степеням (дисциплины с большим количеством междисциплинарных связей), выделения классов модулярности, получаем итоговый граф, представленный на рисунке 6.



Р и с. 6. Итоговый граф G представляющий УП
F i g. 6. The final graph G representing the curriculum



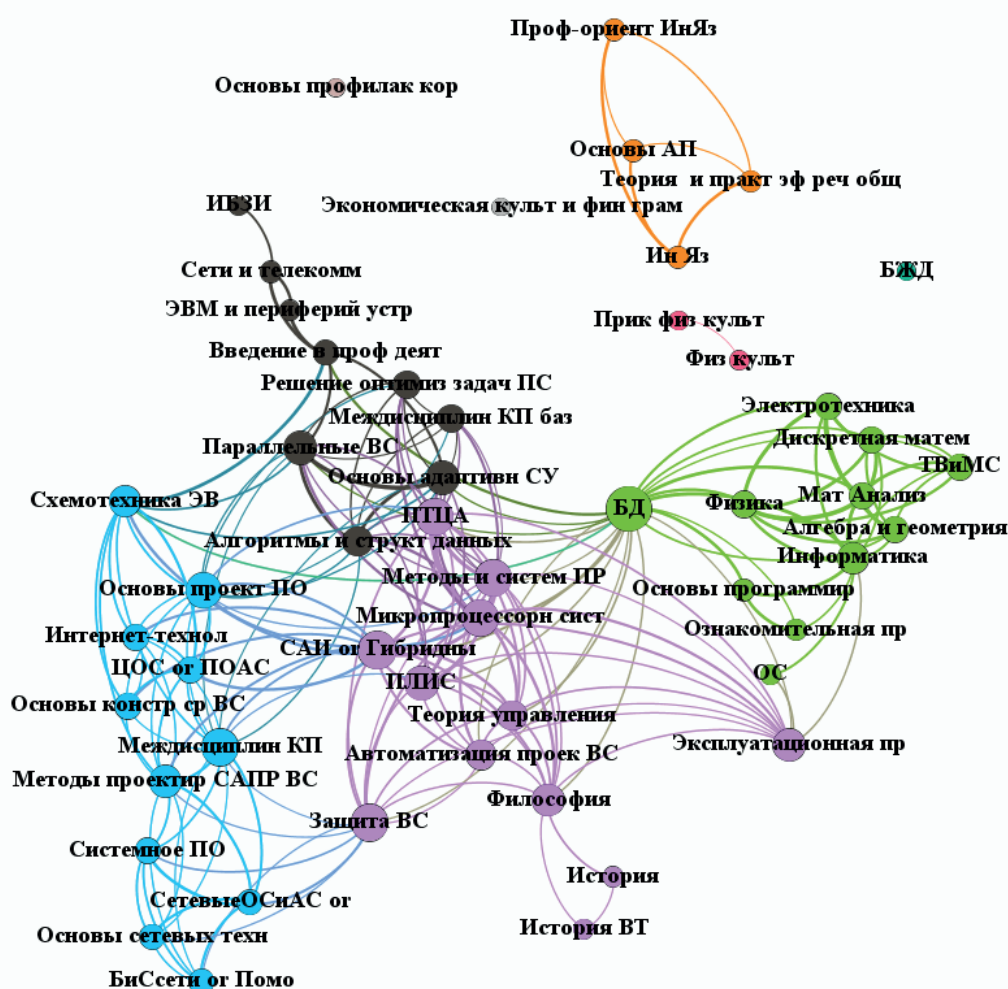
Применение графовой модели для анализа учебных планов

Анализ УП проводился для ОП, реализуемых в Институте космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. На первом этапе работы УП были экспортированы из информационной системы «Планы ВО» в формате excel. Дальнейшая работа заключалась в предобработке данных и создании программного комплекса алгоритмов на языке C++ обработки данных УП для их подготовки к визуализации в виде неориентированного графа.

Предобработка данных является непростой задачей, поскольку УП представляет собой набор таблиц при заполнении которых, необходимо учитывать специфику самих данных, а также человеческий фактор, т.е. возможность допущения неточностей при первичном вводе данных в УП. Для

обработки данных, следуя работе [15], и первоначального анализа были приняты следующие допущения: не учитывалась трудоемкость государственной итоговой аттестации (поскольку включает все компетенции, предусмотренные для УП), трудоемкость освоения дисциплины распределялась поровну между всеми компетенциями, формируемыми в результате ее изучения. Кроме этого, были единственным образом учтены компетенции, формируемые в результате изучения дисциплин по выбору. В результате работы программы и построения графовых моделей было проанализировано несколько УП.

На рисунке 7 представлен граф УП направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (обозначим план А), он образован 52 вершинами (дисциплины) и насчитывает 202 ребра (междисциплинарные связи по компетенциям).



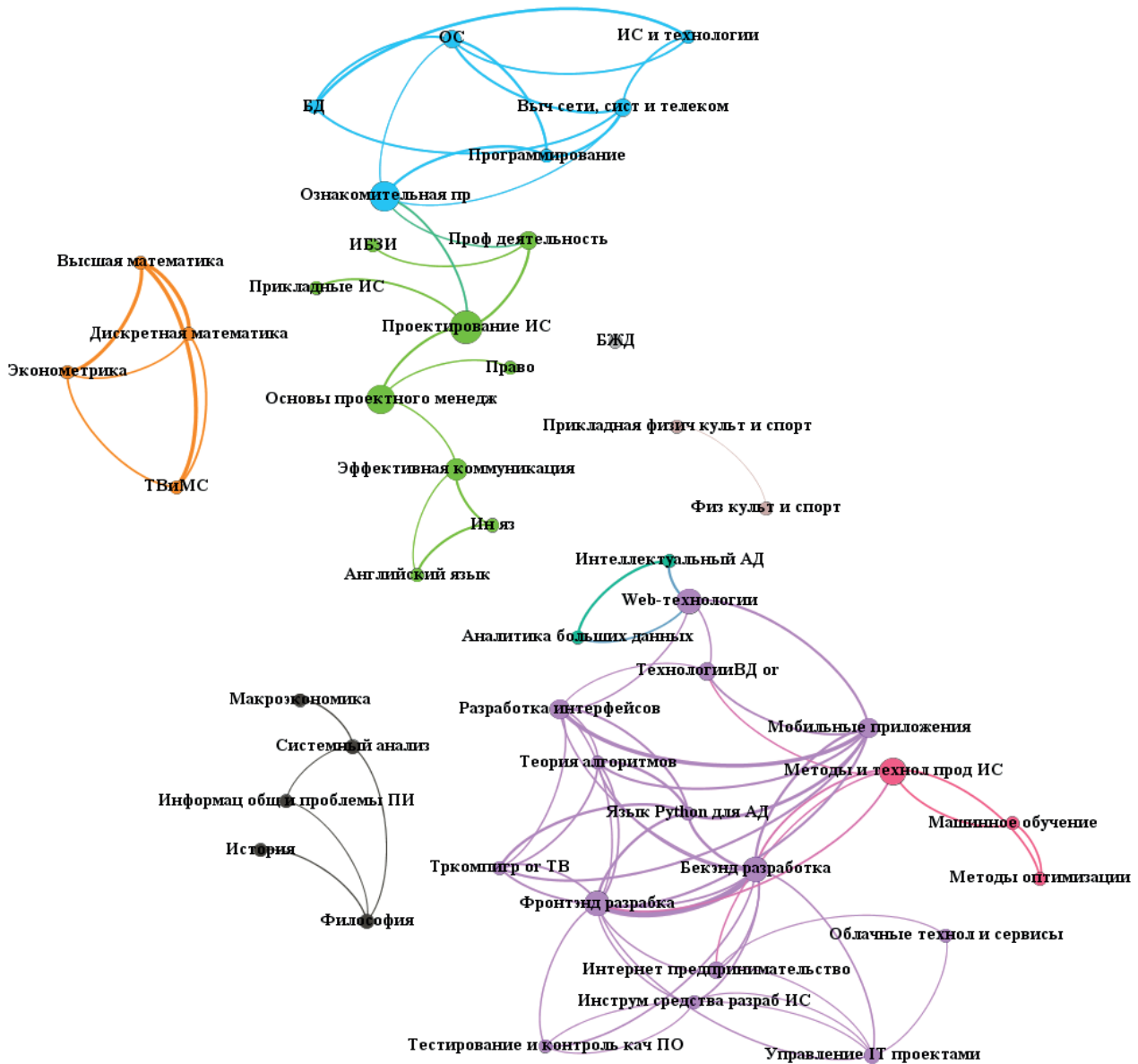
Р и с. 7. Граф УП направления подготовки 09.03.01 (план А)
F i g. 7. Graph of the curriculum for the direction of training 09.03.01 (plan A)



Для плана А были вычислены основные интегральные характеристики УП. Предварительный вывод, который можно сделать из рисунка говорит о связности УП, количество связанных компонент равно 6. Диаметр графа равен 5. Плотность графа составляет 0,152. Модулярность графа 0,469. Количество классов модулярности равно 9. Средняя взвешенная степень вер-

шины составляет 326,36. Средний коэффициент кластеризации 0,82.

На рисунке 8 представлен граф УП направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика» (обозначим план В), он образован 46 вершинами (дисциплины) и насчитывает 84 ребра (междисциплинарные связи по компетенциям).



Р и с. 8. Граф УП направления подготовки 09.03.03 (план В)

Fig. 8. Graph of the curriculum for the direction of training 09.03.03 (plan B)

Для плана В были вычислены основные интегральные характеристики УП. Количество связанных компонент равно 6. Диаметр графа равен 6. Плотность графа составляет 0,081. Модулярность графа 0,589. Количество классов модулярности равно 9. Средняя взвешенная степень вершины составляет

162,21. Средний коэффициент кластеризации 0,73.

Рассмотрим предварительные выводы, который можно сделать для планов А и В. Каждый план является связным. Также при детальном рассмотрении можно выявить ряд дисциплин, которые имеют высокий коэффициент корреляции



с другими предметами по реализуемым компетенциям (на графах эти вершины имеют больших диаметр). Причем для плана А средняя взвешенная степень вершины больше, что говорит о том, что дисциплины данного УП в среднем больше связаны между собой по реализуемым компетенциям. Диаметры графов примерно равны, что позволяет сделать вывод о «длинной» знаниевой приемственности дисциплин. Если рассмотреть структуру планов и подграфы, которыми они представлены, то видно, что для плана А больше изолированных вершин (вершины с нулевой степенью), а для плана В характерна некоторая разнородность подграфов. Это можно объяснить тем, что план В реализуется по трем профилям подготовки (09.03.03.31 «Интернет технологии и мобильные приложения», 09.03.03.32 «Прикладная информатика в социальных коммуникациях», 09.03.03.33 «Прикладная информатика: цифровая экономика») и, если первые два года УП по всем трем профилям един, то потом начитается специализация. Плотность двух планов в данной ситуации не позволяет их сравнивать, учитывая, что направления подготовки разные. Модулярность для двух планов, а также количество выделенных модулей показывает тесные междисциплинарные связи внутри каждого плана. Для плана А средний коэффициент кластеризации выше, что говорит о более тесных междисциплинарных связях, учитывая наличие одного профиля подготовки по сравнению с планом В. С другой стороны, визуально сразу видны дисциплины, которые не коррелируют ни с какой из других дисциплин плана по реализуемым компетенциям, например, «Безопасность жизнедеятельности», «Основы профилактики коррупции». Такой результат в данном случае говорит о высокой значимости данных дис-

циплин, поскольку компетенции УК-8, УК-10, заложенные в данных дисциплинах, не могут быть получены ни из какого другого предмета.

Заключение

Учебный план является одним из основных документов, характеризующих образовательную программу и определяет ее дизайн. Учитывая это, разработка инструментов анализа УП является важной задачей, поскольку такие инструменты помогут создать средства автоматического анализа УП на предмет качества реализуемой ОП. При этом, под качеством ОП можно понимать соответствие дизайна ОП (ее состава, структуры, а также очередности и трудоемкости дисциплин и практик, входящих в нее) заявленным в ней образовательным результатам в форме списка компетенций и их индикаторов.

В настоящей работе был предложен подход к исследованию УП через его представление в виде графа, вершины которого соответствуют образовательным единицам (дисциплинам) УП, а ребра – междисциплинарные связи. Предложенные методы позволяют получать интегральные характеристики УП, на основе которых можно судить о качестве реализуемой ОП, а также проводить сравнительный анализ различных ОП с целью выявления удачных решений с точки зрения дизайна ОП для повышения качества проектирования новых ОП или модернизации существующих. Кроме того, наличие наглядно описанных междисциплинарных связей поможет проводить анализ УП на уровне рабочих программ дисциплин и более тонко понять суть знаниевой приемственности с точки зрения формирования основных образовательных результатов.

Список использованных источников

- [1] Palonen T., Boshuizen H. P. A., Lehtinen E. How Expertise Is Created in Emerging Professional Fields // Promoting, Assessing, Recognizing and Certifying Lifelong Learning. Lifelong Learning Book Series ; ed. by T. Halttunen, M. Koivisto, S. Billett. Vol. 20. Dordrecht : Springer, 2014. P. 131-149. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8694-2_8
- [2] Responsive curriculum development for professional education: Different teams, different tales / J. Vreuls [и др.] // The Curriculum Journal. 2022. Vol. 33, issue 4. P. 636-659. doi: <https://doi.org/10.1002/curj.155>
- [3] Иванов В. Г., Сазонова З. С., Сапунов М. Б. Инженерная педагогика: попытка типологии // Высшее образование в России. 2017. № 8/9(215). С. 32-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29924088> (дата обращения: 10.11.2022).
- [4] Кельчевская Н. Р., Ширинкина Е. В. Интеграция образовательных и профессиональных стандартов в условиях реформирования: проблемы и пути решения // Университетское управление: практика и анализ. 2018. Т. 22, № 1. С. 16-25. doi: <https://doi.org/10.15826/umpra.2018.01.002>
- [5] Сопряжение ФГОС и профессиональных стандартов: выявленные проблемы, возможные подходы, рекомендации по актуализации / С. А. Пилипенко [и др.] // Высшее образование в России. 2016. № 6(202). С. 5-15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26202932> (дата обращения: 10.11.2022).
- [6] Tahirsylaj A., Sundberg D. The unfinished business of defining competences for 21st century curricula – a systematic research review // Curriculum Perspectives. 2020. Vol. 40. P. 131-145. doi: <https://doi.org/10.1007/s41297-020-00112-6>
- [7] Takayama K. OECD, 'Key competencies' and the new challenges of educational inequality // Journal of Curriculum Studies. 2013. Vol. 45, issue 1. P. 67-80. doi: <https://doi.org/10.1080/00220272.2012.755711>
- [8] Anderson-Levitt K., Gardinier M. P. Introduction contextualising global flows of competency-based education: polysemy, hybridity and silences // Comparative Education. 2021. Vol. 57, issue 1. P. 1-18. doi: <https://doi.org/10.1080/03050068.2020.1852719>
- [9] Компетентностный подход к оценке образовательных результатов: опыт российского социологического образования / М. Д. Бершадская [и др.] // Высшее образование в России. 2019. Т. 28, № 2. С. 38-50. doi: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-2-38-50>
- [10] The foundation for future education, teaching, training, learning, and performing infrastructure – The open interoperability conceptual framework approach / A. Perisic [и др.] // Heliyon. 2023. Vol. 9, issue 6. Article number: e16836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16836>



- [11] Wright C., Ritter L. C., Gonzales C. W. Cultivating a Collaborative Culture for Ensuring Sustainable Development Goals in Higher Education: An Integrative Case Study // Sustainability. 2022. Vol. 14, issue 3. Article number: 1273. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031273>
- [12] Сухомлин В. А., Зубарева Е. В. Новый этап международной стандартизации ИТ-образования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17, № 3. С. 697-723. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.697-723>
- [13] Khuzwayo M. The Value of Competence-based Assessment in Pre-service Teacher Training // International Journal of Learning, Teaching and Educational Research. 2020. Vol. 19, no. 9. P. 320-340. doi: <https://doi.org/10.26803/ijlter.19.9.17>
- [14] Black P., Wiliam D. Developing the theory of formative assessment // Educational Assessment, Evaluation and Accountability (formerly: Journal of Personnel Evaluation in Education). 2014. Vol. 21, no. 1. P. 5-31. doi: <https://doi.org/10.1007/s11092-008-9068-5>
- [15] Шахова Е. Ю., Васильева Л. В., Касаткин В. В. Компетентностная составляющая образовательных программ // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2014. № 4(16). С. 109-121. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22837115> (дата обращения: 10.11.2022).
- [16] Мицель А. А., Черняева Н. В. Анализ корреляции дисциплин учебного плана // Инженерное образование. 2016. № 19. С. 62-68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27180329> (дата обращения: 10.11.2022).
- [17] Подготовка конкурентоспособных выпускников международного уровня на основе образовательного стандарта Университета ИТМО / А. А. Шехонин [и др.] // Высшее образование в России. 2019. Т. 28, № 5. С. 9-17. doi: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-5-9-17>
- [18] Kobourov S. G. Force-Directed Drawing Algorithms // Handbook of Graph Drawing and Visualization ; ed. by R. Tamassia. First Ed. New York : Chapman and Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2013. P. 383-408. doi: <https://doi.org/10.1201/b15385>
- [19] Kobourov S. G., Liotta G., Montecchiani F. An annotated bibliography on 1-planarity // Computer Science Review. 2017. Vol. 25. P. 49-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.06.002>
- [20] Models of Online Social Networks / P. Prałat [и др.] // Internet Mathematics. 2009. Vol. 6, issue 3. P. 285-313. doi: <https://doi.org/10.1080/15427951.2009.10390642>
- [21] ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software / M. Jacomy [и др.] // PLoS ONE. 2014. Vol. 9, issue 6. Article number: e98679. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098679>
- [22] Brandes U. A Faster Algorithm for Betweenness Centrality // The Journal of Mathematical Sociology. 2001. Vol. 25, issue 2. P. 163-177. doi: <https://doi.org/10.1080/0022250X.2001.9990249>
- [23] Watts D. J., Strogatz S. H. Collective dynamics of 'small-world' networks // Nature. 1998. Vol. 393, issue 6684. P. 440-442. URL: <https://snap.stanford.edu/class/cs224w-readings/watts98smallworld.pdf> (дата обращения: 10.11.2022).
- [24] Holland P. W., Leinhardt S. Transitivity in Structural Models of Small Groups // Small Group Research. 1971. Vol. 2, issue 2. P. 107-124. doi: <https://doi.org/10.1177/1046496471002002>
- [25] Fast unfolding of communities in large networks / V. D. Blondel [и др.] // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2008. Vol. 2008, no. 10. P. P10008. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>

Поступила 10.11.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принята к публикации 22.02.2023.

Об авторах:

Зыкова Татьяна Викторовна, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности Института космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>**, zykovatv@mail.ru

Кытманов Алексей Александрович, заведующий кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности Института космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79), доктор физико-математических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>**, aakytm@gmail.com

Носков Михаил Валерианович, профессор кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, руководитель Научно-учебной лаборатории методики электронного обучения Института космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-7354>**, mvnoskov@yandex.ru

Халтурин Евгений Александрович, ассистент кафедры информационных систем Института космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-0370>**, ekhalturin@sfu-kras.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



References

- [1] Palonen T, Boshuizen H.P.A., Lehtinen E. How Expertise Is Created in Emerging Professional Fields. In: Halttunen T, Koivisto M., Billett S. (eds.) Promoting, Assessing, Recognizing and Certifying Lifelong Learning. Lifelong Learning Book Series. Vol. 20. Dordrecht: Springer; 2014. p. 131-149. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8694-2_8
- [2] Vreuls J., Koeslag-Kreunen M., van der Klink M., Nieuwenhuis L., Boshuizen H. Responsive curriculum development for professional education: Different teams, different tales. *The Curriculum Journal*. 2022;33(4):636-659. doi: <https://doi.org/10.1002/curj.155>
- [3] Ivanov V.G., Sazonova Z.S., Sapunov M.B. *Inzhenernaya pedagogika: popytka tipologii* [Engineering Pedagogy: Facing Typology Challenges]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* = Higher Education in Russia. 2017;(8/9):32-42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29924088> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [4] Kelchevskaya N.R., Shirinkina E.V. *Integratsiya obrazovatelnykh i professionalnykh standartov v usloviyakh reformirovaniya: problemy i puti resheniya* [Integration of Educational and Professional Standards under Conditions of Reform: Problems and Ways of Solution]. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz* = University Management: Practice and Analysis. 2018;22(1):16-25. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15826/umpa.2018.01.002>
- [5] Pilipenko S.A., Zhidkov A.A., Karavaeva E.V., Serova A.A. *Sopryazhenie fgos i professionalnykh standartov: vyyavlenie problemy, vozmozhnye podkhody, rekomendatsii po aktualizatsii* [On the Correlation Between Federal Educational Standards of Higher Education and Professional Standards: Problems, Possible Approaches, Recommendation on Actualization]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* = Higher Education in Russia. 2016;(6):5-15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26202932> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Tahirsylay A., Sundberg D. The unfinished business of defining competences for 21st century curricula – a systematic research review. *Curriculum Perspectives*. 2020;40:131-145. doi: <https://doi.org/10.1007/s41297-020-00112-6>
- [7] Takayama K. OECD, 'Key competencies' and the new challenges of educational inequality. *Journal of Curriculum Studies*. 2013;45(1):67-80. doi: <https://doi.org/10.1080/00220272.2012.755711>
- [8] Anderson-Levitt K., Gardinier M.P. Introduction contextualising global flows of competency-based education: polysemy, hybridity and silences. *Comparative Education*. 2021;57(1):1-18. doi: <https://doi.org/10.1080/03050068.2020.1852719>
- [9] Bershadskaya M.D., Serova A.V., Chepurenskiy A.I., Zima E.A. *Kompetentnostnyi podkhod k otsenke obrazovatelnykh rezultatov: opyt rossiiskogo sotsiologicheskogo obrazovaniya* [Competence-Based Approach to Assessing Educational Outcomes: The Experience of Russian Sociological Education]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* = Higher Education in Russia. 2019;28(2):38-50. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-2-38-50>
- [10] Perisic A., et al. The foundation for future education, teaching, training, learning, and performing infrastructure – The open interoperability conceptual framework approach. *Heliyon*. 2023;9(6):e16836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16836>
- [11] Wright C., Ritter L.C., Gonzales C.W. Cultivating a Collaborative Culture for Ensuring Sustainable Development Goals in Higher Education: An Integrative Case Study. *Sustainability*. 2022;14(3):1273. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031273>
- [12] Sukhomlin V.A., Zubareva E.V. *Novyi etap mezhdunarodnoy standartizatsii IT-obrazovaniya* [The New Stage of International Standardization of IT Education]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2021;17(3):697-723. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.17.202103.697-723>
- [13] Khuzwayo M. The Value of Competence-based Assessment in Pre-service Teacher Training. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. 2020;19(9):320-340. doi: <https://doi.org/10.26803/ijlter.19.9.17>
- [14] Black P., Wiliam D. Developing the theory of formative assessment. *Educational Assessment, Evaluation and Accountability (formerly: Journal of Personnel Evaluation in Education)*. 2014;21(1):5-31. doi: <https://doi.org/10.1007/s11092-008-9068-5>
- [15] Shakhova E.Yu., Vasileva L.V., Kasatkin V.V. *Kompetentnostnaya sostavlyayushchaya obrazovatelnykh program* [Competence-based component of educational programs]. *Professionalnoe obrazovanie v Rossii i za rubezhem* = Professional Education in Russia and Abroad. 2014;(4):109-121. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22837115> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [16] Mitsel A.A., Chernyaeva N.V. *Analiz korrelyatsii distsiplin uchebnogo plana* [Analysis of the curriculum subjects correlation]. *Inzhenernoye obrazovaniye* = Engineering Education. 2016;(19):62-68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27180329> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [17] Shekhonin A.A., Voznesenskaya A.O., Bakholdin A.V., Gavrilina O.A. *Podgotovka konkurentosposobnykh vypusnikov mezhdunarodnogo urovnya na osnove obrazovatel'nogo standarta Universiteta ITMO* [Training of Competitive Graduates Based on the Educational Standard of the ITMO University]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* = Higher Education in Russia. 2019;28(5):9-17. (In Russ., abstract in Eng.)doi: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-5-9-17>
- [18] Kobourov S.G. Force-Directed Drawing Algorithms. In: Tamassia R., ed. Handbook of Graph Drawing and Visualization. First Ed. New York: Chapman and Hall/CRC, Taylor & Francis Group; 2013. p. 383-408. doi: <https://doi.org/10.1201/b15385>
- [19] Kobourov S.G., Liotta G., Montecchiani F. An annotated bibliography on 1-planarity. *Computer Science Review*. 2017;25:49-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.06.002>
- [20] Prałat P., et al. Models of Online Social Networks. *Internet Mathematics*. 2009;6(3):285-313. doi: <https://doi.org/10.1080/15427951.2009.10390642>



- [21] Jacomy M., Heymann M., Venturini T., Bastian M. ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software. *PLoS ONE*. 2014;9(6):e98679. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098679>
- [22] Brandes U. A Faster Algorithm for Betweenness Centrality. *The Journal of Mathematical Sociology*. 2001;25(2):163-177. doi: <https://doi.org/10.1080/0022250X.2001.9990249>
- [23] Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 1998;393(6684):440-442. Available at: <https://snap.stanford.edu/class/cs224w-readings/watts98smallworld.pdf> (accessed 03.12.2022).
- [24] Holland P.W., Leinhardt S. Transitivity in Structural Models of Small Groups. *Small Group Research*. 1971;2(2):107-124. doi: <https://doi.org/10.1177/1046496471002002>
- [25] Blondel V.D., Guillaume J.L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2008;2008(10):P10008. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>

Submitted 10.11.2022; approved after reviewing 17.01.2023; accepted for publication 22.02.2023.

About the authors:

Tatyana V. Zyкова, Associate Professor of the Chair of Applied Mathematics and Computer Security, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>**, zykovatv@mail.ru

Alexey A. Kytmanov, Head of the Chair of Applied Mathematics and Computer Security, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>**, aakytm@gmail.com

Mikhail V. Noskov, Professor of the Chair of Applied Mathematics and Computer Security, Head of the Scientific and Educational Laboratory of E-learning Methodology, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-7354>**, mvnoskov@yandex.ru

Evgenii A. Khalturin, Assistant of the Chair of Information Systems and Technologies, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-0370>**, ekhalturin@sfu-kras.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

