

Современные стандарты и тренды подготовки профессиональных кадров высшей квалификации в области информационных технологий

В.А. Сухомлин

МГУ имени М.В. Ломоносова,
Федеральный исследовательский центр
“Информатика и управление” РАН

Целью данной работы является анализ современных стандартов и трендов в подготовке ИТ-специалистов высшей квалификации (бакалавры, магистры, аспиранты, PhD) с акцентом на подготовку специалистов в области высокопроизводительных вычислений. Выполнен анализ современного состояния процессов международной стандартизации, включая: стандартизацию куррикулумов в системе ИТ-образования, создание отраслевых сводов знаний, стандартизацию квалификационных требований (компетенций/ навыков ИТ). Показан кризис системы ИТ-образования, ее неспособность обеспечивать потребности цифровой экономики высококвалифицированными ИТ-кадрами по многим актуальным технологическим направлениям. Рассмотрены основные требования к подготовке специалистов высшей квалификации в области суперкомпьютерных технологий, в частности, к математической, практической, общенаучной подготовке. С целью поиска путей выхода из кризиса анализируются тенденции, на основе которых возможно формирование инновационных решений, повышающих эффективность процессов подготовки ИТ-кадров. Определяется список лучших кейс-технологий, которые используются в мировой образовательной практике для подготовки ИТ-специалистов в области суперкомпьютерных технологий (НРС).

Ключевые слова: куррикулум, куррикулумная стандартизация, компьютинг, фреймворк, высокопроизводительные вычисления, суперкомпьютеры, компетенции и навыки, своды профессиональных знаний, онлайн-лаборатории, кейс-технологии, кризис системы ИТ-образования.

1. Введение

В основе современных научных, промышленных и технологических вызовов лежит широкое использование компьютерных и информационных технологий (ИТ), для развития и применения которых требуются ИТ-специалисты высшей квалификации, владеющие набором языков и систем программирования, разнообразными фреймворками и технологическими платформами, суперкомпьютерными технологиями, методами и технологиями искусственного интеллекта (ИИ), аналитики больших данных,

системной инженерией, включая методы и средства моделирования и симуляции систем, создания цифровых двойников кибер-физических систем и метавселенных, а также владеющие многими другими инструментальными средствами и прикладными знаниями.

Особенно актуальной становится проблема подготовки высоко квалифицированных ИТ-специалистов, способных развивать и профессионально использовать суперкомпьютерные технологии, которые являются ключевым инструментом в таких областях, как:

- фундаментальные исследования (физика частиц, моделирование климата, исследования в биоинформатике)
- индустрия и экономика (оптимизация сложных производственных процессов, разработка новых видов материалов, финансовый анализ)
- оборона и безопасность (криптография, симуляция военных операций, моделирование и испытания военных систем нового поколения)
- медицина и фармацевтика (молекулярное моделирование и разработки новых лекарственных препаратов, персонализированная медицина) и многие другие.

Именно развитие суперкомпьютерных технологий является стратегически важной задачей для обеспечения технологического суверенитета и конкурентоспособности страны.

2. Образовательные стандарты в области ИТ

В сфере управления персоналом и подготовки профессиональных ИТ-кадров важную роль играют следующие три процесса международной стандартизации:

- (а) стандартизация куррикулумов (учебно-методических материалов) по направлениям подготовки ИТ-кадров в системе образования
- (б) создание сводов профессиональных знаний (Body of Knowledge — BoK) для актуальных доменов и видов деятельности области ИТ
- (с) стандартизация квалификационных требований (компетенций / навыков / профилей профессиональных ролей) в области информационных и коммуникационных технологий (ИКТ, в данной работе ИКТ и ИТ будем считать синонимами).

При этом в последние годы характерным для этих процессов становится все более тесная интеграция, уровень которой в настоящее время позволяет рассматривать их как целостную систему процессов стандартизации методических основ для решения задач кадрового менеджмента и подготовки профессиональных кадров в области ИТ [1].

2.1. Куррикулумная стандартизация

Быстрое развитие ИТ-индустрии и расширение сфер ее применения требует постоянного обновления образовательных программ. При этом требования к уровню подготовки профессиональных кадров в области ИТ постоянно возрастают, что обусловлено масштабными и сложными задачами цифровой трансформации экономики.

Исторически, начиная с середины 60-х годов прошлого столетия, ведущую роль в формировании мировой системы подготовки ИТ-кадров, играли образовательные

стандарты в виде признанных на международном уровне программ учебных курсов или, так называемых, куррикулов [2, 3].

Такие куррикулы характеризуются тем, что:

- ориентированы на подготовку ИТ-профессионалов (бакалавров, магистров) по конкретным направлениям области ИТ (далее профилям)
- содержат описание свода знаний (СЗ) или БОК (Body of knowledge), соответствующих требованиям к профессиональным знаниям и умениям по конкретным профилям ИТ и определяющих содержание подготовки, т.е. чему учить учащихся по данному профилю
- определяют ядро свода знаний (core), содержащее описания минимально необходимых для конкретного профиля базовых знаний, которыми должны обладать все выпускники по данному профилю
- используют наборы дидактических параметров, связанных с элементами сводов знаний и определяющих рекомендуемые объемы учебной нагрузки, уровень когнитивности освоения профессиональных знаний и умений, требуемые социально-личностные характеристики
- как правило, в куррикулах включается описание в качестве примеров образовательных программ и программ отдельных дисциплин ведущих университетов.

Процесс куррикулумной стандартизации можно разделить на три этапа:

1) Первый этап — 1968–2000 гг. (с принятия первого куррикулума по профилю computer science — CS1968 до принятия в 2000 г. новой концепции для области ИТ, получившей академическое название компьютеринг (computing)). На данном этапе доминировали два направления подготовки — computer science и computer engineering, стандарты куррикулов по которым обновлялись примерно один раз за десятилетие.

2) Второй этап — 2000–2020 гг., который определяется внедрением и развертыванием новой концепцией компьютеринга, в которой дифференцированы следующие основные направления (профили) подготовки ИТ-профессионалов:

- Компьютерные науки (computer science — CS)
- Вычислительная техника (computer engineering — CE)
- Информационные системы (information systems — IS)
- Информационные технологии (information technology — IT)
- Программная инженерия (software engineering — SE) дополненные в последствии направлениями:
- Кибербезопасность (cybersecurity — Cybsec)
- Наука о данных (data science — DS)

На этом этапе обновление куррикулов шло существенно более быстрыми темпами по сравнению с предыдущим этапом, а основным концептуальным и методическим документом куррикулумной стандартизации стал CC2005 [4], в котором определена архитектура системы куррикулов, описаны важнейшие методологические положения, лежащие в основе куррикулумного подхода.

3) Третий этап куррикулумной стандартизации ИТ-образования начался с момента публикации (31 декабря 2020 г.) нового документа Computing Curricula 2020 (CC2020) [5], заявленного как преемник CC2005 и новый основной концептуальный и

методологический документ куррикулумной стандартизации на следующее десятилетие. Как определено в CC2020, цель его разработки состояла в том, чтобы предоставить глобальное руководство в развивающейся среде компьютеринга (ИТ), влияющее на программы бакалавриата в области ИТ во всем мире. Видение этого проекта заключалось в создании востребованного и надёжного набора руководящих принципов для использования (будущими) студентами, промышленностью, правительствами и образовательными учреждениями во всем мире с целью получения представления об ожиданиях выпускников компьютерных программ бакалавриата на следующее десятилетие. А миссия проекта CC2020 определялась так — создать всемирно признанный фреймворк для определения и сравнения программ бакалавриата в области компьютеринга (computing или ИТ), которые отвечают растущим требованиям меняющегося технологического мира и были бы полезны для студентов, промышленности и академических кругов.

CC2020 — многоплановый документ, основные темы которого касаются таких вопросов как: уточнение понятия компьютеринга, определение современной архитектуры компьютеринга, состав ожидаемых направлений развития куррикулумной стандартизации, определение главной методологической концепции в разработке куррикулумов, основанной на компетентностно-базируемом подходе («основное внимание должно уделяться тому, что студенты должны уметь выполнять, а не тому, чему должны учить преподаватели»), методы спецификации образовательного контента (BoK) и др.

На рис. 1 представлена текущая архитектура стандартов куррикулумов документа CC2020 [5].

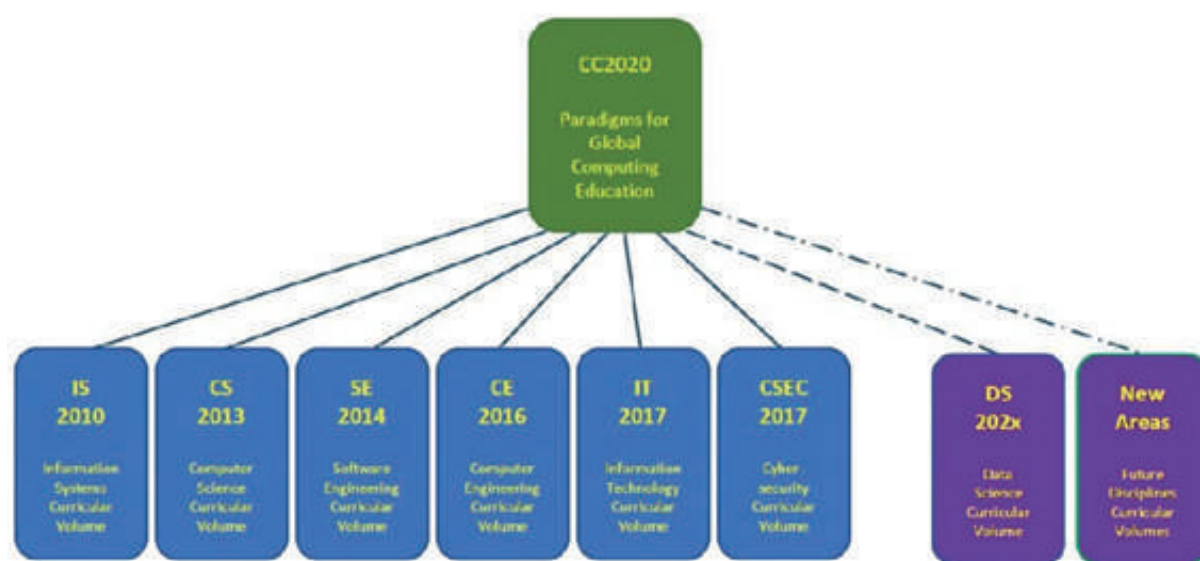


Рис. 1: Архитектура стандартов куррикулумов CC2020 [5]

Состав стандартов куррикулумов, действующих на текущий момент включает:

- Information Systems 2020 (IS2020)
- Computer Science Curricula 2023 (CS2023)
- Software Engineering Curricula 2014 (SE2014)
- Computer Engineering Curricula 2016 (CE2016)
- Information Technology Curricula 2017 (IT2017)

- Cybersecurity Curricula 2017 (CSEC2017)
- Data Science Computing Competencies 2021 (DSCC2021),
- Other emerging disciplines

В CC2020 определён набор направлений (профилей), которые в ближайшие годы могут стать самостоятельными направлениями подготовки и для которых уже ведётся разработка собственных куррикулов. Этот набор называется «текущими куррикулумными областями» (Current curricular areas). В него входят следующие направления:

- искусственный и расширенный интеллект — ИИ (artificial and augmented intelligence (AI))
- облачные вычисления (cloud computing)
- умные города (smart cities)
- устойчивость (sustainability)
- параллельные вычисления (parallel computing)
- интернет вещей (Internet of things)
- граничные вычисления (edge computing)

Как отмечалось, основную часть куррикулов составляет описание образовательного контента, (т.е. того, чему учить), называемого сводом или объемом знаний (Body of Knowledge — BoK). До 2016 г. традиционным способом представления образовательного контента являлось описание свода знаний в виде иерархической структуры, включающей такие элементы знаний, как, предметные области (areas), модули знаний (units), темы/подтемы (themes/subthemes). Такой подход к определению содержания обучения называется знание-ориентированным (knowledge-based learning — KBL). В подходе KBL уделяется также должное внимание определению результатов обучения (outcomes), которые связываются с соответствующими им дидактическими единицами свода знаний с помощью аппарата дидактических параметров, определяющих уровни когнитивности и другие аспекты результатов обучения.

Начиная с 2016 г. в куррикулах нового поколения стало характерным применение компетентностного подхода, при котором своды знаний не определяются в явной форме, а задаются опосредованно через структурированные наборы требований к знаниям и умениям в форме компетенций, трактуемых в качестве результатов обучения. Такой подход именуется компетентностно-базированным (Competency-based learning — CBL). Описание ИТ-компетенций смещает акцент в куррикулах с описания знаний на прагматику достижения конечного результата обучения, т.е. описание того, что выпускники могут делать в практических ситуациях. В подходе CBL более акцентированно и явно определяются цели обучения, также упрощается определение самого ВОК, так как не требуется его детализация до уровня тем/подтем (такую работу придётся выполнять вузам, чтобы сконструировать учебные курсы, развивающие требуемые навыки/компетенции). Таким образом в подходе CBL образовательный контент определяется в виде иерархической структуры областей компетенций или навыков.

Именно подход CBL принимается в CC2020 как основной при разработке куррикулов, а компетенция принимается за основу для выражения как цели обучения в ИТ-образовании, так и способности выполнять задачи на рабочем месте.

Понятие компетенция в CC2020 определяется следующим образом.

Компетенция = Знания + Навыки + Диспозиции в контексте задачи
(Knowledge + Skills + Disposition -> Task)

Такая модель компетенции иллюстрируется на рис. 2.

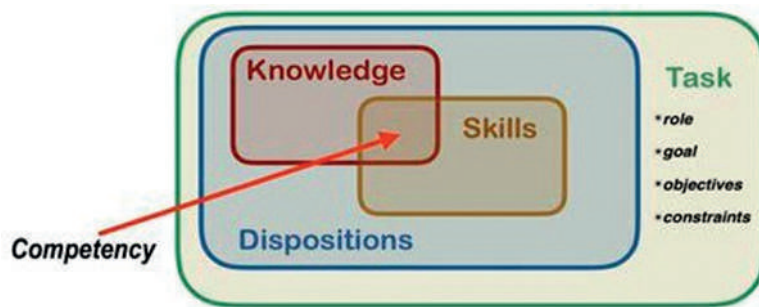


Рис. 2: Модель понятия компетенции (K, S, D) [5]

Таким образом для подготовки к карьере требуется, чтобы студенты развивали ряд качеств, организованных по трём параметрам: 1) знания, 2) навыки и 3) склонности (dispositions), где элементы компетенции интерпретируются следующим образом.

Знания — это компонент компетентности как фактического понимания того, что знает человек. Этот компонент статичен и инертен; на него нужно действовать со знанием дела, чтобы стать поведением.

Навыки дают возможность применять знания для активного выполнения задачи. Следовательно, навык выражает элемент знания, который используется с умением для определения аспекта компетенции «ноу-хау». В определении компетенции в CC2020 приняты уровни когнитивного процесса Блума [6], чтобы указать уровень навыков, ожидаемых при успешном выполнении задачи.

Диспозиции или предрасположенности — это привычные наклонности, которые представляют собой социально-эмоциональные склонности, пристрастия и отношения (например, надёжность, ответственность). Диспозиции определяют, склонен ли человек использовать свои навыки и как он это делает.

Задача — это конструкция, в контексте которой определяется умелое применение знаний и конкретизируются диспозиции.

Новое поколение стандартов куррикулумов в значительной мере следует рекомендациям CC2020. К ним относятся:

1) IS2020 — Модель компетенций для программ бакалавриата по информационным системам. Совместная программа ACM/AIS IS2020 (A Competency Model for Undergraduate Programs in Information Systems) [7]. IS2020 разработан в строгим соответствии с рекомендациями CC2020.

2) CCDSC2021 — Компетенции в области вычислений для учебных программ бакалавриата по науке о данных (CCDSC) (Computing Competencies for Undergraduate Data Science Curricula).

Целевая группа ACM по науке о данных. Январь 2021 г. [8]. В CCDSC2021 за основу принимается модель знаний (KBL), дополненная компетенциями для определения результатов обучения.

3) CS2023 — Учебные программы по компьютерным наукам 2023 г. ACM/IEEE-CS/AAAI (Computer Science Curricula) [9]. Куррикулум CS2023, представляющий собой комплексную ревизию предыдущей редакции (CS2013), также в основе своей применяет модель знаний, дополненная моделью компетенций в части определения способностей решения определённого набора задач.

CS2023 включает достаточно объёмную предметную область «Parallel and Distributed Computing», являющуюся фундаментом для освоения суперкомпьютерных технологий, которые рассматриваются как центральный корпус знаний и практик, пронизывающих почти все другие предметные области свода знаний этого стандарта. Параллельные и распределённые методы программирования формируют ядро высокопроизводительных вычислений (HPC), распределённых систем и почти каждого вычислительного приложения. Эта область знаний разделена на пять модулей знаний, а именно: базовые механизмы параллельных и распределённых программ и их выполнения; коммуникация (через каналы, память или общие хранилища данных), механизмы координации параллельных действий для достижения общих результатов, методы оценки с учётом спецификаций, параллельные и распределённые алгоритмы в различных прикладных областях.

Подводя некоторый итог куррикулумной стандартизации, следует отметить, что стандарты куррикулумов по указанным выше традиционным направлениям подготовки представляют собой тщательно разработанные фреймворки, чрезвычайно полезные для разработки учебных программ подготовки ИТ-кадров. Однако данный процесс явно отстаёт от текущих потребностей в развёртывании большого числа новых профилей в области ИТ, что объясняется сложностью самих фреймворков и сложностью организации процессов их разработки.

2.2. Создание профессиональных сводов знаний

Профессиональные (отраслевые) своды знаний (Body of Knowledge) или BoKs представляют собой описания знаний и умений, навыков/компетенций по конкретным направлениям ИТ или сферам деятельности, связанным с ИТ. За разработку и сопровождение таких BoKs отвечают авторитетные международные организации. Каждый BoK по существу есть евангелие по конкретному ИТ-направлению (например, программная инженерия, системная инженерия, кибербезопасность) или некоторому виду деятельности (например, управление проектами или управление деловыми отношениями). Основным содержанием BoK является описание структурированных объёмов знаний, которые используются профессионалами соответствующей дисциплины (считается примерно с трех-четырех летним стажем работы) в своей практике. Таким образом BoK определяет совокупности знаний в определённой области ИТ, которую работник должен освоить, чтобы его можно было рассматривать или сертифицировать как практикующего специалиста.

Совокупность таких BoKs составляют знаниевую основу области ИТ. Список из наиболее известных сводов знаний включает несколько десятков BoKs [10]. Примерами наиболее актуальных сводов знаний для подготовки ИТ-специалистов являются: SWEBOK V4 (Software Engineering BOK) [11], SEBOK (Systems Engineering BOK) [12], CyBOK (Cybersecurity BOK) [13].

При разработке новых куррикулумов и образовательных ресурсов отраслевые своды знаний выполняют роль базы знаний. Их исключительная полезность подтверждена автором в его работах. В частности на основе CyBOK автором разработан

куррикулум «Кибербезопасность» [14–16], при этом определение свода знаний этого куррикулума было разработано на основе СуВОК, а также на основе модели навыков кибербезопасности [17], в свою очередь разработанной на принципах современной концепции цифровых навыков, рассмотренных ниже. А на основе SEBOK и SWEBOK разработан учебник по системной и программной инженерии [18].

Сводов знаний, посвящённых суперкомпьютерным технологиям и стандартизованных на международном уровне ещё не разработано.

2.3. Стандартизация квалификационных требований

Стандартизация квалификационных требований (компетенций / навыков / профилей профессиональных ролей) в области информационных и коммуникационных технологий играет важную роль при разработке образовательных стандартов и ресурсов. Как показано в работе [10] этот процесс стандартизации тесно связан с рассмотренным выше процессом куррикулумной стандартизации. Существует множество систем (фреймворков) спецификаций и классификаций навыков и компетенций, ролей и т.п.

В сфере кадрового менеджмента наиболее известными и авторитетными фреймворками являются:

- фреймворк навыков для информационного века (SFIA — Skills Framework for the Information Age)
- Европейский фреймворк компетенций (e-CF — European e-Competence Framework)
- The i Competency Dictionary, the Information Technology Promotion Agency (IPA) (iCD словарь i компетенций, разработанный Агентством по продвижению ИТ в Японии)
- профстандарты ИКТ

Анализ этих фреймворков и стандартов проводится в [19].

В последние годы доминирующую роль в системе кадрового менеджмента играет концепция навыков (skills). Под навыком в ней понимается комплекс характеристик исполнителя специфической части производственной деятельности (активности), необходимый для эффективного выполнения соответствующей работы на конкретном рабочем месте, благодаря тому, что такой исполнитель обладает необходимыми знаниями, ноу-хау, умениями, опытом, социально-личностными качествами. Более точно понятие навыка можно определить следующим образом.

Навык (skill) — совокупность качеств, необходимых для профессионального, эффективного выполнения некоторой роли в производственной деятельности или некоторой ее части. Навык определяется:

- **активностями** производственной деятельности (целевыми или операционными действиями в процессе реализации производственной деятельности),
- **знаниями**, необходимыми для выполнения активностей и являющимися ключевым элементом навыка, определяющим его содержание,
- **социально-личностными** качествами исполнителя навыка (называемые также мягкими навыками или диспозицией),
- **контекстом рабочего места** — часть в описании навыка, конкретизирующая дополнительные функциональные и нефункциональные требования к навыку (аспекты), связанные с жизненным циклом рабочего места.

Навыки представляют собой спецификации типовых модулей профессиональной деятельности и предназначены для описания ролей/подролей в производственных процессах.

Наиболее широко распространенным стандартом цифровых навыков является стандарт SFIA, определяющий навыки и компетенции, необходимые специалистам, которые проектируют, разрабатывают, внедряют, управляют и защищают данные и технологии, обеспечивающие работу цифрового мира [20]. Стандарты SFIA (последняя версия SFIA 9) определяют систему классификации и методику описания цифровых навыков области ИТ, соответствующих требованиям цифровой экономики. С помощью навыков системы SFIA, используемых в качестве строительных блоков, может быть описан обширный класс профессиональных ролей, связанных с областью ИКТ и ее приложениями.

Модель классификации ИТ-навыков в SFIA представляет собой трехуровневую иерархическую систему, на верхнем уровне которой навыки разбиваются на классы категорий, затем, на втором уровне, категории структурируются на подкатегории, которые в свою очередь выступают как совокупности близких по роду деятельности навыков, составляющих третий, самый нижний, уровень иерархии системы классификации. Всего в SFIA 9 определяется: 6 категорий навыков, 22 подкатегории и 148 индивидуальных навыков, причём общее описание навыка уточняется описанием каждого допустимого для него уровня исполнения (уровня ответственности).

В SFIA определены семь уровней ответственности, которые названы следующими глаголами в повелительном наклонении:

- L=1 — следуй
- L=2 — помогай
- L=3 — применяй
- L=4 — создавай возможности
- L=5 — обеспечивай/советуй
- L=6 — иницируй/влиять
- L=7 — формулируй стратегию, вдохновляй и мобилизуй.

Семантика каждого уровня ответственности определяется по единому шаблону, содержащему следующие пять разделов, определяющие поведенческие факторы: Autonomy (Автономность), Influence (Влияние), Complexity (Сложность), Knowledge (Знание), Business skills (Бизнес навыки).

В качестве примера навыка в SFIA рассмотрим общее описание навыка «High-performance computing» (Высокопроизводительные вычисления) — НРСС, назначение которого: использование передовых компьютерных систем и специальных методов программирования для решения сложных вычислительных задач. Уровни ответственности для этого навыка: 5, 6, 7.

Основными задачами для навыка являются:

- использование суперкомпьютеров и методов параллельной обработки для решения сложных вычислительных задач с акцентом на разработку алгоритмов и систем параллельной обработки
- использование суперкомпьютеров исследовательских работах для выполнения объёмных вычислений, компьютерного моделирования, имитации и анализа больших данных.

Деятельность может включать, но не ограничиваться:

- проектирование и оптимизация параллельных алгоритмов
- управление и поддержка инфраструктур НРС
- разработка программного обеспечения для сред НРС
- проведение анализа производительности и оптимизация приложений НРС
- сотрудничество с исследователями для перевода научных проблем в решения НРС.

Технология НРС применяется в различных дисциплинах, включая: биологические науки и молекулярное моделирование, географические данные, разведку месторождений нефти и газа, моделирование климата и прогнозирование погоды, физическое моделирование, криптоанализ.

2.4. Выводы по процессам стандартизации

1) Современные артефакты рассмотренных процессов международной стандартизации в области кадрового менеджмента и подготовки профессиональных ИТ-кадров представляют собой достаточно развитую методическую основу для разработки актуальных образовательных стандартов и программ.

2) Состояние разработки новых стандартов куррикулумов по наиболее актуальным технологическим направлениям цифровой экономики, таким, как: Интернет вещей, блокчейн, суперкомпьютерные технологии, мобильная сетевая инфраструктура 5G-6G, облачные и граничные вычисления, цифровые двойники и BIM, умные города, иммерсивные технологии (включающие дополненную реальность (augmented reality — AR), виртуальную реальность (virtual reality - VR) и смешанную реальность (mixed reality — MR)), метавселенные, умный транспорт, умные материалы и др., следует признать неудовлетворительным. Это говорит о серьёзном кризисе системы ИТ-образования, ее невозможностью обеспечения потребностей цифровой экономики всем спектром высококвалифицированных ИТ-кадров, что ведёт к необходимости поиска путей повышения эффективности системы образования. В частности, такими путями могут быть:

- вовлечение в вузовские образовательные процессы специалистов-практиков из ведущих компаний цифровой экономики
- интеграция системы образования с корпоративными программами профессиональной подготовки
- освоение инновационных подходов в образовательной деятельности.

3. Особенности подготовки специалистов высшей квалификации в области суперкомпьютерных технологий

Подготовка специалистов высшей квалификации (магистров, аспирантов, исследователей) в области суперкомпьютерных технологий требует сочетания глубоких теоретических знаний и практических навыков, а также знаний в области приложений.

3.1. Математическая подготовка специалистов высшей квалификации в области суперкомпьютерных технологий

Основой подготовки специалистов высшей квалификации по суперкомпьютерным технологиям является фундаментальная математическая подготовка и подготовка по теоретическим основам компьютерных наук. Специалист в области суперкомпьютерных технологий должен владеть вычислительной математикой, методами линейной алгебры, параллельными алгоритмами, методами оптимизации и математического моделирования, а также методами математической статистики, дискретной математики и теории сложности.

В состав таких критически важных дисциплин и их основных разделов программ подготовки специалистов по суперкомпьютерным технологиям должны входить:

1) Вычислительная математика (Computational Mathematics)

- Численные методы (аппроксимация, интерполяция, численное интегрирование и дифференцирование)
- Методы решения СЛАУ (прямые и итерационные методы, разреженные матрицы)
- Оптимизация вычислений (минимизация ошибок, устойчивость алгоритмов)
- Численные методы решения дифференциальных уравнений (конечные разности, метод конечных элементов, спектральные методы)
- Разностные схемы

2) Линейная алгебра

- Матричные вычисления (разложения: LU, QR, SVD, собственные значения)
- Итерационные методы (метод сопряжённых градиентов, GMRES)
- Разреженные матрицы и их хранение (форматы CSR, CSC, ELLPACK)

3) Параллельные вычисления и распараллеливание алгоритмов

- Теория графов (распределение нагрузки, декомпозиция задач)
- Методы декомпозиции (domain decomposition, multigrid methods)
- Алгоритмы синхронизации (барьеры, атомарные операции, lock-free структуры)

4) Дискретная математика

- Теория сложности вычислений (классы P, NP, параллельные алгоритмы)
- Быстрые алгоритмы (БПФ, быстрое умножение матриц)
- Графовые алгоритмы (поиск кратчайших путей, максимальные потоки)

5) Теория вероятностей и статистика

- Стохастические методы (методы Монте-Карло, марковские процессы)
- Статистический анализ данных (обработка больших массивов)
- Машинное обучение и оптимизация (градиентные методы, SGD)

6) Математическое моделирование

- Дифференциальные уравнения в частных производных (УрЧП)
- Многомасштабное моделирование (молекулярная динамика, методы coarse-graining)
- Моделирование физических процессов (гидродинамика, квантовая механика)

7) Математические методы оптимизации

- Выпуклая оптимизация (линейное/нелинейное программирование)
- Глобальная оптимизация (генетические алгоритмы, swarm optimization)
- Оптимизация в распределённых системах (распределённый SGD, federated learning)

8) Теория информации и кодирования

- Сжатие данных (алгоритмы для больших массивов)
- Коды коррекции ошибок (в распределённых вычислениях)
- Криптография (защита данных в HPC-кластерах)

9) Формальные методы и верификация

- Математическая логика и теория автоматов (верификация параллельных алгоритмов)
- Теория типов (корректность программ)

3.2. Владение методами и инструментами параллельного и распределенного программирования

Специалист в области суперкомпьютерных технологий должен понимать архитектуру высокопроизводительных систем, владеть языками программирования, методами параллельного и распределенного программирования, методами и средствами хранения данных и организации вычислительных расчётов на суперкомпьютерных системах. В частности, актуальными темами здесь являются:

- 1) **Архитектуры HPC** (кластеры, GPU-ускорители, векторные процессоры, квантовые сопроцессоры)
- 2) **Системы хранения** (Lustre, GPFS, NVMe-over-Fabrics)
- 3) **Языки программирования**: C/C++, Fortran, Python (с ускорением через Numba/Cython)
- 4) **Параллельное и распределенное программирование**, включая:
 - Парадигмы и инструментальные средства параллельного и распределенного программирования (MPI, OpenMP, CUDA, SYCL, OpenACC)
 - Оптимизация кода (векторизация, cache-friendly подходы, уменьшение коммуникационных накладных расходов)
 - Анализ масштабируемости (Amdahl's Law, Gustafson's Law, weak/strong scaling)
- 5) **Инструменты мониторинга и профилирования** (Intel VTune, Nsight, Arm Forge и др.)
- 6) **Инструменты управления очередями задач** (Slurm, PBS, LSF)
- 7) **Фреймворки поддержки суперкомпьютерных вычислений**: PETSc, Trilinos, FFTW, BLAS/LAPACK (MKL, cuBLAS)
- 8) **Реализация практических проектов на суперкомпьютерах**, например, на суперкомпьютерах «Ломоносов-2» или «Кристофари».

3.3. Управление данными и I/O-оптимизация в суперкомпьютерных технологиях

В высокопроизводительных вычислениях (HPC) управление данными и оптимизация ввода-вывода (I/O) играют ключевую роль, поскольку объёмы данных в научных симуляциях могут достигать петабайтов, и традиционные методы хранения и обработки становятся узким местом. Поэтому при подготовке профессионалов в области супервычислений становится актуальным изучение и освоение методов и инструментов в таких областях как:

- 1) **Эффективная работа с большими данными и их хранение, использование форматов с быстрым доступом** (HDF5, NetCDF, ADIOS2, распределенные файловые системы, многоуровневое хранение))
- 2) **Оптимизация ввода-вывода** (коллективные операции, буферизация и агрегация, staging- подходы, кэширование, сжатие))
- 3) **Визуализация данных во время выполнения моделирования** (In-situ и in-transit визуализация (ParaView, VisIt))
- 4) **Оптимизация обработки больших данных** (оптимизация доступа, кэширование, сжатие, ZFP, SZ)
- 5) **Промежуточная обработка** (выборка данных, фильтрация данных перед записью).

3.4. Междисциплинарность и мягкие навыки

Суперкомпьютерные технологии нашли широкое применение во многих научных и прикладных областях, поэтому специалисты по таким технологиям должны обладать прикладными знаниями в этих областях, чтобы понимать специалистов-предметников, эффективно участвовать в оптимизации вычислительных экспериментов. Такими областями, в которых суперкомпьютерные технологии нашли широкое применение, в частности являются:

- Вычислительная физика, вычислительная химия, биоинформатика (моделирование квантовых систем, молекулярная динамика)
- Климатология и прогнозирование (глобальные климатические модели)
- Машинное обучение и Big Data (обучение крупных нейросетей)
- Астрофизика и космология (N-тельные симуляции)
- Инженерные расчёты (CFD, прочность материалов).

Указанные выше домены, в которых используются суперкомпьютерные технологии, сами являются наукоемкими областями. Поэтому целенаправленная подготовка профессиональных исследователей в этих областях, владеющих суперкомпьютерными технологиями, может осуществляться на основе образовательных программ, построенных по формулам [5]:

- **Computing + X**, где «X» — некоторая прикладная для ИТ область (например, биология, астрономия, химия, экономика, лингвистика и др.). Дипломы в этой категории могут включать термин «информатика», например, медицинская информатика, юридическая информатика, биоинформатика или химическая информатика, и т.п.
- **X + Computing**, где «X» являются основными областями интересов, такими как физика, биология, медицина или другие приложения ИТ.

«X + Computing» отличается от «Computing + X» тем, что в первом базовая область — это не ИТ-направление (например, химия), тогда как во втором базовая область — это один из профилей ИТ.

Характерными для области суперкомпьютерных технологий мягкими навыками (Soft skills) или социально-личностными качествами являются научная коммуникация, навыки написания научных статей и заявок на вычислительные ресурсы, умение работать в распределенных командах.

3.5. Вывод

Подготовка специалистов в области суперкомпьютерных технологий должна сочетать:

- Фундаментальную математическую подготовку и подготовку по теоретическим основам компьютерных наук
- Профессиональный уровень программирования
- Получение практического опыта работы на реальных суперкомпьютерах
- Владение инструментами управления, мониторинга и оптимизации вычислительного процесса на суперкомпьютерных системах
- Знание одной или нескольких прикладных областей, в которых осуществляются научные симуляции с использованием суперкомпьютерных систем
- Стажировку в суперкомпьютерных центрах на реальных научных проектах
- Использование инновационных подходов в подготовке специалистов по суперкомпьютерным технологиям.

4. Внедрение в образовательную практику инноваций, соответствующих ключевым трендам в подготовке ИТ-специалистов

Как следует из сказанного выше, для своевременного обеспечения востребованными высококвалифицированными ИТ-кадрами современную цифровую экономику системе образования необходимо искать пути для оперативного развёртывания новых актуальных направлений подготовки и привлечения в учебные процессы экспертов-практиков.

Анализ возможных путей решения этой проблемы позволяет выявить следующие тенденции, на основе которых возможно формирование инновационных решений, повышающих эффективность процессов подготовки ИТ-кадров. К ним в первую очередь следует отнести:

1) Интеграцию академического и корпоративного образования

- совместные программы с ведущими ИТ-компаниями (например, Яндекс.Практикум, Huawei Academy)
- широкое использование наборов реальных кейсов
- включение в учебный процесс активных форм коллективной деятельности практики типа хакатонов

2) Гибкие и персонализированные траектории обучения

- допущение обучения дисциплинам по выбору студентов с помощью технологий Micro-credentials и нанодипломов (Coursera, edX)
- использование методов адаптивного обучения на основе средств ИИ

3) Дистанционные и гибридные форматы

- онлайн-лаборатории
- VR-симуляторы (например, для обучения кибербезопасности)
- программы двойных дипломов и пр.

Учитывая фундаментальный характер подготовки ИТ-специалистов по суперкомпьютерным технологиям, весьма плодотворным и практичным подходом к повышению качества подготовки представляется развитие кейс-технологий в сочетании с дистанционными формами обучения.

Кейс-технология (от англ. «case» — случай) — интерактивная технология обучения, направленная на формирование у обучающихся знаний, умений, личностных качеств на основе анализа и решения реальной или смоделированной проблемной ситуации в контексте профессиональной деятельности, представленной в виде кейса [21]. При этом описание ситуации, содержащей проблему, представляется в виде, вызывающем дискуссию и активное обсуждение. Обучающимся предлагается проанализировать ситуацию, возможно, предварительно изучив дополнительные источники информации, и предложить возможные варианты решения и выбрать лучший из них.

Применение кейс-технологии в обучении позволяет реализовать проблемное обучение, оценить сформированность компетенций (способность работать в команде, способность к самоорганизации и самообразованию, способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий, способность учитывать современные тенденции развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности и др.). Как правило, кейс-технология направлена на развитие междисциплинарных знаний и умений, способствует развитию метапредметных знаний и умений обучающихся, включая коммуникативные навыки, умение работать в команде, проявлять гибкость, улаживать конфликты, умение убеждать и искать компромиссы и др.

В мировой образовательной практике для подготовки ИТ-специалистов в области суперкомпьютерных технологий (HPC) активно используются кейс-технологии, включая реальные задачи из науки и промышленности.

К наиболее продвинутым решениям применения кейс-технологий в HPC можно отнести:

1. **PRACE** (Partnership for Advanced Computing in Europe). PRACE предлагает образовательные программы и кейсы на основе реальных задач HPC, включая моделирование климата, квантовую физику и биоинформатику. Примеры кейсов:

- PRACE Case Studies — коллекция реальных задач с решениями¹
- PATC (PRACE Advanced Training Centres) — курсы с практическими кейсами²

¹<https://prace-ri.eu/training-support/case-studies/>

²<https://events.prace-ri.eu/courses>

2. **XSEDE** (Extreme Science and Engineering Discovery Environment, США). Программа предлагает кейсы для обучения работе с суперкомпьютерами, включая параллельные вычисления и оптимизацию кода. Примеры кейсов:

- XSEDE HPC Case Studies — учебные материалы и задачи¹
- HPC University — ресурсы с практическими заданиями²

3. **NVIDIA Deep Learning Institute (DLI) + HPC**. NVIDIA предлагает кейсы по использованию GPU в HPC, включая задачи машинного обучения и физического моделирования. Примеры кейсов:

- NVIDIA DLI HPC Courses — практические лаборатории³
- CUDA Case Studies — оптимизация вычислений на GPU⁴

4. **Oak Ridge National Laboratory (ORNL) — HPC Training**. ORNL проводит школы (например, HPC Summer School) с реальными кейсами из энергетики и материаловедения⁵ Примеры кейсов:

- ORNL Case Studies — разбор задач на суперкомпьютере Summit⁶

5. **Intel® HPC Academy**. Описание: Intel предоставляет кейсы по оптимизации кода для процессоров Xeon и ускорителей. Примеры:

- Intel HPC Toolkit Case Studies — примеры оптимизации⁷

6. **MIT Lincoln Laboratory — Supercomputing Challenges**. MIT использует кейс-методы в курсах по параллельным вычислениям. Пример:

- MIT Lincoln Lab HPC — задачи из оборонных и научных проектов⁸

7. **SURF (Нидерланды) — HPC Education** Голландский центр SURF предлагает кейсы по использованию суперкомпьютеров в исследованиях. Пример:

- SURF HPC Cases — учебные материалы⁹

8. Российские практики: МГУ, МФТИ, РАН Примеры:

- Суперкомпьютерный консорциум университетов России — кейсы на базе “Ломоносова” (МГУ)¹⁰
- МФТИ — HPC School — задачи по моделированию¹¹

Таким образом к лучшим кейс-практикам можно отнести:

- реальные научные и инженерные кейсы (PRACE, ORNL)
- практические лаборатории на суперкомпьютерах (NVIDIA DLI, XSEDE)
- оптимизационные задачи (Intel, CUDA)

Для углублённого изучения суперкомпьютерных технологий безусловный интерес представляют открытые курсы (Coursera, edX) и материалы конференций (SC, ISC High Performance).

¹<https://www.xsede.org/education-and-outreach>

²<https://hpcuniversity.org/>

³<https://www.nvidia.com/en-us/training/>

⁴<https://developer.nvidia.com/cuda-education>

⁵<https://www.olcf.ornl.gov/for-users/training/hpc-user-training/>

⁶<https://www.olcf.ornl.gov/case-studies/>

⁷<https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/tools/oneapi/hpc-toolkit.html>

⁸<https://www.ll.mit.edu/r-d/high-performance-computing>

⁹<https://www.surf.nl/en/high-performance-computing>

¹⁰<https://hpc-russia.ru/>

¹¹<https://mipt.ru/education/chairs/supercomputers/>

5. Заключение

Медленные темпы развития международной стандартизации в области ИТ-образования, быстрое устаревание знаний, нехватка квалифицированных преподавателей-практиков, разрыв между теорией и требованиями индустрии — основные причины кризиса в области ИТ-образования, ее неспособностью обеспечивать потребности цифровой экономики высококвалифицированными ИТ-кадрами по многим актуальным технологическим направлениям. Все это ведёт к необходимости к широкому внедрению инновационных решений, повышающих эффективность процессов подготовки ИТ-кадров. В работе выполнен анализ современных стандартов и трендов в подготовке ИТ-специалистов высшей квалификации (бакалавры, магистры, аспиранты, PhD), в частности, анализ современного состояния процессов международной стандартизации, включая: стандартизацию куррикулумов в системе ИТ-образования, создание отраслевых сводов знаний, стандартизацию квалификационных требований (компетенций/ навыков ИТ). Рассмотрены основные требования к подготовке специалистов высшей квалификации в области суперкомпьютерных технологий, в частности, к математической, практической, общенаучной подготовке. С целью поиска путей выхода из кризиса анализируются тенденции, на основе которых возможно формирование инновационных решений, повышающих эффективность процессов подготовки ИТ-кадров. Определяется список лучших кейс-технологий, которые используются в мировой образовательной практике для подготовки ИТ-специалистов в области суперкомпьютерных технологий (НРС).

Ключевым фактором в повышении эффективности системы подготовки ИТ-кадров высшей квалификации, особенно в области суперкомпьютерных технологий — стратегического направления в обеспечении государственной независимости, несомненно является тесное взаимодействие и партнёрство университетов, бизнеса и государства.

Список литературы

- [1] Сухомлин В.А., Зубарева Е.В. Новый этап международной стандартизации ИТ-образования // Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование», [S.l.], v. 17, n. 3, sep. 2021. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/794/>
- [2] Сухомлин В.А. Международные образовательные стандарты в области информационных технологий // Прикладная информатика, 2012, № 1(37), с. 33-54.
- [3] Sukhomlin V., Zubareva E. Analytical Review of the Current Curriculum Standards in Information Technologies. Communications in Computer and Information Science. Conference paper. First Online: 12 May 2020. pp 3-41, 13th International Conference, SITITO 2018, Moscow, Russia, November 29 — December 2, 2018, Revised Selected Papers. Conference proceedings© 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_1
- [4] Computing Curricula 2005 (CC2005). Association for Computing Machinery and Computer Society of IEEE. [Электронный ресурс] <https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/cc2005-march06final.pdf>

- [5] Computing Curricula 2020 (CC2020). Association for Computing Machinery and Computer Society of IEEE. [Электронный ресурс] <https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/cc2020.pdf>
- [6] Anderson L.W. et al. A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revisions of Bloom's taxonomy of educational objectives, abridged edition, (White Plains, NY Longman, 2001)
- [7] A Competency Model for Undergraduate Programs in Information Systems The Joint ACM/AIS IS2020. [Электронный ресурс] <https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/is2020.pdf>
- [8] Computing Competencies for Undergraduate Data Science Curricula (CCDSC) ACM Data Science Task Force January 2021. [Электронный ресурс] https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/dstf_ccdsc2021.pdf
- [9] CS2023. [Электронный ресурс] <https://csed.acm.org/wp-content/uploads/2024/01/Body-of-Knowledge-v1-bookmarksv2.pdf>
- [10] [Электронный ресурс] <https://sfia-online.org/en/tools-and-resources/bodies-of-knowledge/list-of-bodies-of-knowledge>
- [11] SWEBOK V4 2025 (Software Engineering BOK). [Электронный ресурс] <https://ieeecs-media.computer.org/media/education/swebok/swebok-v4.pdf>
- [12] SEBoK v. 2.11, released 25 November 2024. [Электронный ресурс] https://sebokwiki.org/w/images/sebokwiki-farm!w/5/5c/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_v2.11.pdf
- [13] CyBOK (Cybersecurity BOK) Version 2.1 June 5, 2019. [Электронный ресурс] https://www.academia.edu/40172072/CyBOK_Cyber_Security_Body_Of_Knowledge
- [14] Сухомлин В.А. Куррикулум дисциплины «Кибербезопасность»: научное издание / В.А. Сухомлин, С.В. Лебедь, О.С. Белякова, А.С. Климина, М.С. Полянская. – Москва: Фонд «Лига интернет-медиа», 2022. – 402 с. <https://doi.org/10.25559/f6676-8117-2920-j>
- [15] Сухомлин В.А. Архитектура и принципы разработки куррикулума для дисциплины “Кибербезопасность”. Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование», [S.l.], v. 16, n. 4, p. 927-939, dec. 2020. <https://doi.org/10.25559/SITIT0.16.202004.927-939>
- [16] Сухомлин В.А. Создание профиля “Кибербезопасность и искусственный интеллект”. Международный научный журнал «Современные информационныетехнологии и ИТ-образование», [S.l.], v. 17, n. 3, sep. 2021.
- [17] Сухомлин В.А., Белякова О.С., Климина А.С., Полянская М.С., Русанов А.А. Фреймворк «Модель навыков кибербезопасности» — 2020. Научное издание.

- [18] Сухомлин В.А., Романов В.Ю., Гапанович Д.А. Введение в модельно-ориентированную системную и программную инженерию (MBSSE): учебник / В.А. Сухомлин, В.Ю. Романов, Д.А. Гапанович. — Москва : Фонд «Лига интернет-медиа»; МАКС Пресс, 2024. — 672 с. <https://doi.org/10.29003/m4300.978-5-317-07289-6>.
- [19] Сухомлин В.А. Система развития цифровых навыков ВМК МГУ & Базальт СПО. Методика классификации и описания требований к сотрудникам и содержанию образовательных программ в сфере информационных технологий / В.А. Сухомлин, Е.В. Зубарева, Д.Е. Намиот, А.В. Якушин. — М.: Базальт СПО; МАКС Пресс, 184 с. <https://doi.org/10.29003/m2575.978-5-317-06336-8>
- [20] SFIA 9 Home. [Электронный ресурс] <https://sfia-online.org/en/sfia-9>
- [21] Описание образовательной технологии «Кейс-технология». Материалы ИТМО <https://edu.itmo.ru/files/95>