

## СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СО РАН

**Валерий Павлович Ильин**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирск, Российская Федерация, ilin@sscc.ru*

*История учит человека тому,  
что человек ничему не учится из истории.*

Парадокс Гегеля

**Аннотация** – Излагается история зарождения и развития проблематики искусственного интеллекта в ВЦ СО АН СССР под руководством А.П. Ершова, Г.И. Марчука, С.К. Годунова и Н.Н. Яненко, включая взаимодействие человека и ЭВМ, автоматизацию построения алгоритмов и аналитических преобразований. Приводится также обзор дальнейших исследований, проводившихся в ИМ, ИСИ, ИВМиМГ и в других институтах СО РАН, включая анализ результатов последних лет по интеллектуализации математического и программного обеспечения нового поколения для суперкомпьютерного предсказательного моделирования.

**Ключевые слова** – искусственный интеллект, автоматизация построения алгоритмов, взаимодействие человека с компьютером, математическая база знаний.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект (ИИ), совместно с проблемами больших данных и высокопроизводительными вычислениями, составляет неделимую тройственную структуру, на которой зиждется суперкомпьютерный прогресс, лежащий в основе протекающей ныне 4-й индустриальной революции. Естественно, что актуальность интеллектуализации математического и программного обеспечения (МПО) значительно увеличивается с появлением постпетафлопсных и эксафлопсных многопроцессорных вычислительных систем (МВС). Однако справедливости ради следует отметить, что перспективность распознавательных возможностей компьютера была предсказана еще в 19-м столетии создателем аналитической машины Ч. Бэббиджем и Ады Лавлейс, которая признана первым в мире программистом [1].

Направления фундаментальных исследований по искусственному интеллекту очень обширны, и не менее востребованы его актуальнейшие приложения: автоматизация построения алгоритмов, распознавание образов, базы знаний, экспертные системы, нейросети, машинное обучение, системы принятия решений, робототехника (в том числе беспилотники) и т.д. Наше основное внимание будет сосредоточено на методологических принципах интеллектуализации разработок вычислительных алгоритмов и технологий, реализуемых в составе интегрируемых вычислительных окружений (ИВО) для высокопроизводительного решения междисциплинарных прямых и обратных задач предсказательного моделирования, уже являющегося главным орудием получения новых фундаментальных и прикладных знаний.

Основы этих подходов зарождались еще полвека назад, и одним из центров кристаллизации новых идей явился Новосибирский Академгородок, ставший после своего основания в 1957 г. столицей Сибирского отделения АН СССР. Следует отметить, что это были годы восстановления страны из послевоенной разрухи, период холодной войны и экономической изоляции от развитых западных государств.

Альма матер сибирской *Computer Science* стал Вычислительный центр СО АН СССР, официально открытый в январе 1964 г. и до этого функционировавший в составе Института математики СО АН. Организатор и директор ВЦ, Гурий Иванович Марчук – будущий преемник М.А. Лаврентьева на посту Председателя СО АН (1975-1980) и последний президент АН СССР (1985-1991), привлек в новый институт выдающихся ученых, создавших свои научные школы мирового уровня, среди них А.П. Ершов, М.М. Лаврентьев, Н.Н. Яненко, А.А. Алексеев, С.К. Годунов, Г.А. Михайлов [2]. На пике своего развития ВЦ СОАН насчитывал около 1300 сотрудников, а его машинный парк по суммарной мощности ЭВМ занимал третье место в Советском Союзе. Созданный как автономная организация Главный Производственный Вычислительный центр был идеальной фабрикой машинного времени, успешно внедрявшей новинки компьютерных технологий, включая отечественные параллельные машины ПС-2000 и ЕС ЭВМ, причем работа еще в 1970-е гг. велась фактически на коммерческих началах. ВЦ СОАН был Меккой для мировых ученых, специалистов по вычислительной математике и моделированию, а

также по теоретическому, системному и прикладному программированию, сотрудники института были активными участниками и организаторами международных конференций. Не случайно в этой «точке кипения» зародились новые идеи и междисциплинарные научные направления, одним из которых явился искусственный интеллект.

ВЦ стал кузницей кадров для многих институтов Академгородка и других научных центров. На его базе функционировало пять университетских кафедр, в том числе самые массовые кафедры программирования в НГУ и НЭТИ. ВЦ СОАН организовал ряд дочерних институтов, куда направлялись научные десанты, а около 30 «выпускников» Вычислительного центра стали директорами институтов. После развала СССР и трагических для российской науки 90-х годов целая армия научно-инженерных специалистов, особенно программистов, ушла за границу и в бизнес.

Однако заложенная в советское время российская академическая среда и образовательные структуры оказались необычайно живучими, и начало 21-го столетия стало периодом активизации вычислительных наук и технологий. Появившиеся в Академгородке многочисленные «софтовые» фирмы приобрели международную известность как «силиконовая тайга», которая успешно существует, в том числе за счет зарубежных заказов. Неслучайно данный регион оказался центром притяжения для ряда транснациональных компьютерных и нефтяных компаний.

Мир *Computer Science* за последние десятилетия кардинально изменился. Появление Интернета, мобильных телефонов, социальных сетей и суперкомпьютеров экзафлопсного уровня ставит перед цивилизованным миром качественно новые вызовы, еще далеко не осознанные научным сообществом. Темпы технологического прогресса ускоряются, в этой ситуации обретают качественно новый смысл философские и гуманитарные вопросы устойчивого мирового развития. По этим историческим процессам существует разнообразная литература [3-15], и здесь одну из ключевых ролей играет искусственный интеллект, анализ этапов становления и развития которого может помочь в осознании его миссии и формировании дорожной карты, которая должна найти решение для новых беспредельных проблем цивилизации.

## II. ПЕРВЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ «ЛЯСТОЧКИ»

Зарождение и формирование «сибирского» искусственного интеллекта происходило в ВЦ СО АН, который отделился от Института математики СО АН СССР в 1964 г. Понятно, что вычислительные науки – это область интеллектуальной деятельности. И наоборот, искусственный интеллект невозможен без преобразования информации, одним из важнейших видов которого являются вычисления. С появлением первых ЭВМ стало очевидно, что они кардинально повлияют на формы и содержание человеческой деятельности. В 1948 г. Н. Винер ввел термин «кибернетика» – наука об управлении и передаче данных, это понятие не могло не включать интеллектуальные аспекты. К сожалению, в СССР политические идеологи заклеили эту область как «реакционную лженауку». Постепенно эти философские «вывихи» исправлялись, чему способствовала опубликованная в 1955 г. в журнале «Вопросы философии» статья С.Л. Соболева, А.И. Китова и А.А. Ляпунова в защиту кибернетики. Сейчас это слово почти исчезло из русскоязычной научной литературы. Позднее ему на смену пришел термин «информатика», но ненадолго.

Алексей Андреевич Ляпунов (1911-1973) по праву считается основоположником отечественной школы программирования. В 1952 г. на кафедре вычислительной математики МГУ, возглавляемой С.Л. Соболевым, он объявил спецкурс «Принципы программирования», во время чтения которого зародились развитые затем А.А. Ляпуновым идеи автоматизации программирования, операторного метода и синтаксических структур, реализованные в первых отечественных трансляторах. После переезда в Академгородок Алексей Андреевич возглавил отдел математической логики и кибернетики и сразу активизировал местную кибернетическую жизнь. Он дома организовал семинар по кибернетике, куда ходили и чистые математики, и лингвисты, и экономисты, и биологи. В НГУ А.А. Ляпунов основал кафедру теоретической кибернетики и был одним из организаторов знаменитой Новосибирской физматшколы. Все последние годы своей жизни Алексей Андреевич увлеченно продвигал проблемы кибернетического эксперимента в исследованиях производственных процессов, биологии, имитационного моделирования, лингвистики и машинного перевода. Без сомнения, его можно назвать предтечей современного, т. е. интеллектуального, математического моделирования.

Огромную роль в жизни Института математики СО АН СССР сыграл Леонид Витальевич Канторович, проработавший в нем с 1960 по 1971 г. Еще в 1953-1954 гг., после появления первых ЭВМ, он разработал методологию крупноблочного программирования с использованием операторных схем, аналитических выкладок и построением программирующих программ. В Академгородке Леонид Витальевич организовал и возглавил кафедру вычислительной математики НГУ и отделение

математической экономики Института математики, в котором активно развивались методы оптимизации и их реализации на вычислительных машинах. Здесь же был разработан проект специализированной «арифметической машины» (АМ) для решения задач линейной алгебры и линейного программирования, которая явилась прообразом будущих векторных конвейерных процессоров.

Говоря об этом «инкубационном» периоде сибирских вычислительных наук, нельзя не восхититься прозорливостью М.А. Лаврентьева и С.Л. Соболева, которые, будучи «чистыми» математиками, смогли предвидеть мировые тенденции *Computer Science* и сделали не только необходимые, но и достаточные выводы для обеспечения развития Сибирского отделения.

Крупнейшим подразделением молодого Вычислительного центра СОАН был отдел программирования, взявшийся под руководством А.П. Ершова за решение грандиозной задачи – разработку языка, транслятора и системы программирования АЛЬФА – русского варианта ALGOL, являвшегося в 1960-е годы каноническим средством описания алгоритмов. Этот проект инициировал поток разнообразных исследований и по теории программирования, и по технологиям трансляции, и по языковым аспектам, и по вопросам искусственного интеллекта. Одна из основных задач ИИ – совершенствование взаимодействия человека с ЭВМ. Этой идее был посвящен доклад Г.И. Марчука и А.П. Ершова, представленный на конгрессе Международной федерации по обработке информации в 1965 г., где авторы сформулировали проблему создания системы программирования для автоматизации построения алгоритма решения задачи в достаточно общей операторной постановке. Своеобразным подтверждением актуальности данной тематики является недавний интеллектуальный эксперимент по игре профессионалов в «живые», или активные, шахматы, когда игрок – это человек с компьютером. Оказалось, что сильнейшая пара не та, в которую входит супергроссмейстер или суперкомпьютер, а та, где наилучшее взаимопонимание человека и ЭВМ.

Любопытно, что первая защищенная в ВЦ кандидатская диссертация (В.Л. Катков, 1965 г.) была посвящена интеллектуализации сложной математической задачи – групповому анализу дифференциальных уравнений, разрабатываемому Л.В. Овсянниковым в Институте гидродинамики СОАН. Созданная тогда программа КИНО (Координаты ИНфинитезимального Оператора) была бы «в теме», востребованной и в наши дни. В рамках системы АЛЬФА И.В. Поттосиным был разработан ДИФПРОЦЕССОР для автоматизированного дифференцирования функций, а М.М. Бежановой – подсистема ТЕНЗОР, осуществляющая выполнение векторно-матричных операций. Была также создана система АНАЛИТИК с реализацией схемы Л.В. Канторовича для программирования математической символики на ЭВМ. На машинах того поколения (1966 г.) реализовали систему разделения времени АИСТ-0, которую сам А.П. Ершов сравнивал с установкой ракетного двигателя на телегу.

В 1973 г. была сформирована группа А.С. Нариньяни, в 1977 г. реорганизованная в Лабораторию искусственного интеллекта, в которой велись исследования по общению с компьютером на языке естественного типа, математической лингвистике и вычислениям на недоопределённых моделях. Первоначальный проект коллектива, однако, был связан с разработкой математического и программного обеспечения для «макета шагающего автомата, управляемого от ЦВМ». Далее крупной разработкой стала РИТА (Рисунок – Информация – Текст – Автор) – система перевода словесного описания в рисунок, основанная на цифровизации конструкций русского языка. Развитием лингвистических исследований явилась большая разработка ЗАПСИБ (ЗАПрос к Справочно-Информационной Базе), призванная реализовать поддержку диалога человека с ЭВМ и основанная на семантическом анализе текстов с широкой областью применения. В лаборатории ИИ был также реализован теоретико-множественный язык СЕТЛ, ориентированный на программирование логически сложных задач. Параллельно с языковыми разработками создавались программные инструменты для построения ряда практических диагностических экспертных систем.

На основе разработанного А.С. Нариньяни аппарата недоопределённых вычислений была предложена система программирования УНИКАЛЬК, в математическом плане реализующая оригинальный способ решения обратных задач идентификации параметров модели [16]. Может показаться неожиданным, но такой подход переключается с попытками формализации интеллектуальной деятельности, активно развиваемой в течении многих лет Г.С. Альтшуллером и его последователями в системе ТРИЗ (Теория Решения Изобретательных Задач) [17].

Лаборатория ИИ плодотворно сотрудничала с коллегами из Франции, Германии и других стран. Ее результаты были опубликованы в специальном выпуске журнала *Communications of the ACM* под названием «*Soviet Computing*». В 1990 г. коллектив лаборатории перешел в только что созданный Институт систем информатики (ИСИ СОАН СССР), где лаборатория искусственного интеллекта успешно функционирует по сей день.

В 1992 г. А.С. Нариньяни переехал в Москву и возглавил там Российский НИИ Искусственного интеллекта с филиалом в Новосибирске. Позднее его ученики организовали программистскую компанию ЛЕДАС, успешно выполняющую заказы по актуальным САПРовским проблемам и в настоящее время. Лаборатория ИИ в ИСИ СО РАН, руководимая Ю.А. Загоруйко, вносит свой существенный вклад в развитие инженерии знаний.

Перейдем к более прикладным областям программирования, связанными с обеспечением вычислительных экспериментов, методологией и технологиями математического моделирования. Фактически в 1960-1980-е гг. зародилось новое направление человеческой деятельности, в котором переплелись и фундаментальные проблемы, и не менее актуальные технические вопросы. Вычислительная математика и информатика, стали реальным орудием познания во всех производственных и социальных сферах.

Одним из центров кристаллизации зарождающейся научной области стал сформированный и возглавляемый Н.Н. Яненко отдел механики сплошных сред ВЦ СО АН СССР. Организационно он существовал с 1964 по 1976 г., после чего практически все его сотрудники перешли в Институт теоретической и прикладной механики СОАН СССР, директором которого стал Н.Н. Яненко. Ядро отдела МСС составляли Ю.А. Березин, Г.В. Демидов, В.М. Ковеня, А.Н. Коновалов, В.М. Фомин, В.П. Шапеев, Ю.И. Шокин – ученые с разными интересами и судьбами, но все они внесли существенный вклад в становление оригинальной вычислительной школы, по праву носящей имя Н.Н. Яненко. Николай Николаевич организовал также кафедру численных методов механики сплошных сред НГУ, профессорско-преподавательский штат которой фактически состоял из сотрудников его отдела.

Проблематика механики сплошных сред всеобъемлюща: гидро- и газодинамика, упругость твердого тела и пластичность, фильтрация многофазных сред и физика плазмы. Все эти задачи имеют экстремальную вычислительную сложность, характеризующуюся высокой размерностью, большим количеством неизвестных функций, сильной нелинейностью процессов и неоднородностью материальных свойств. Ситуация кардинально усугубляется, когда заказчиками являются представители оборонных министерств, что однозначно определяет жесткие требования к точности. Из конкретных жизненных условий возник вопрос почти гамлетовского звучания: как на существующем техническом и программном обеспечении решать большие задачи? А если этот вопрос трансформировать, то получается новая научная проблема: какой должна быть архитектура вычислительной системы, инструментальных и прикладных программных комплексов, чтобы эти задачи решались эффективно?

Эти вопросы стали активно обсуждаться на семинарах отдела МСС, которые благодаря организационной деятельности Николая Николаевича переросли во всесоюзные. Впечатляет даже простое перечисление тематики семинаров и школ, руководителем которых был Н.Н. Яненко: модели механики сплошной среды, аналитические методы в газовой динамике, численное решение задач вязкой несжимаемой жидкости, решение задач теории упругости и пластичности, численное решение задач фильтрации многофазной жидкости, комплексы программ для задач математической физики. За последним впоследствии утвердилось название «семинар по пакетам прикладных программ». Его восемь сессий-совещаний, прошедших за 1971-1983 гг. в Новосибирске, Иркутске, Таллинне, Днепрпетровске, Ташкенте и других городах СССР, вовлекли сотни ведущих специалистов страны, включая академиков А.А. Самарского, О.М. Белоцерковского, Н.Н. Моисеева, и сыграли незаменимую методологическую и организационную роль в становлении и развитии отечественной вычислительной информатики.

Именно на этих заседаниях вырабатывались основные понятия, определения и методологические принципы, ставшие фундаментом новой дисциплины, получившей недавно официальный статус специальности «математическое моделирование». Дело доходило до философских споров, например, на тему, является ли программный или математический модуль объективной реальностью?!

Н.Н. Яненко, совместно с А.Н. Коноваловым, ввел и развил ряд основополагающих концепций и положений. В 1972-1973 гг. он сформулировал свою знаменитую технологическую цепочку современной вычислительной математики: реальное явление → его математическая модель → численный алгоритм → программа, реализующая этот алгоритм → вычисления по этой программе → анализ результатов. Отсюда возникает задача систематизации и оптимизации методов, применяемых на каждом из взаимосвязанных шагов технологической цепочки, установления соотношений между элементами этих структур и глобальной оптимизации всей вычислительной схемы. Здесь проблема заключается в кардинальном повышении производительности труда математика-программиста, являющейся черепашей на фоне экспоненциально роста мощностей вычислительной техники.

На основе модульного анализа задач и алгоритмов были созданы технологические парадигмы и конкретные разработки пакетов прикладных программ, включающих развитые системные и функциональные наполнения. Коллегами Н.Н. Яненко (В.М. Ковеня, А.П. Лымарев, А.Д. Рычков и др.),

уже в составе ИТПМ СОАН СССР, были реализованы программные комплексы АРФА, ИСТОК, ВАМЕР и СПРУТ для исследований в области аэродинамики и гидродинамики, построенные на передовых по тем временам принципах архитектур и организации эксплуатации. Под руководством А.Н. Коновалова коллективом разработчиков (Г.В. Шустов, А.И. Бугров, Л.Б. Чубаров и др.) была создана серия ППП с развитыми системными компонентами: ЗЕРКАЛО для решения задач теории упругости при моделировании деформаций крупногабаритных оптических изделий, НЕФТЬ для расчета фильтрационных процессов при добыче нефти с помощью вытеснения ее водой. При поддержке Николая Николаевича Ю.И. Шокин со своими учениками развил цикл теоретических и экспериментальных исследований по интервальному анализу.

Можно напомнить также ещё одну знаковую работу Н.Н. Яненко (выполненную совместно с В.П. Шапеевым и В.П. Ильиным), связанную с интеллектуализацией построения алгоритмов, а именно – автоматическим выводом разностных схем высокого порядка точности на основе машинных символьных преобразований. Николай Николаевич – один из первых математиков в мире, кто профессионально занялся распараллеливанием алгоритмов, главным стратегическим направлением вычислительной математики в эпоху многопроцессорных суперкомпьютеров. Еще в 1977 г. он опубликовал статью об организации параллельных вычислений и «распараллеливании прогонки». Здесь обнаружилось то счастливое обстоятельство, что изобретенный Н.Н. Яненко 20 лет назад метод дробных шагов идеально реализуется на многопроцессорных вычислительных системах. Однако возникает другое узкое место – временные потери при межпроцессорных коммуникационных обменах и Николай Николаевич активно обсуждает вопросы компьютерных архитектур с ведущими отечественными разработчиками ЭВМ. Большое внимание он уделял алгоритмическому обоснованию перспектив создания высокопроизводительных специализированных процессоров параллельного действия для решения определенных классов задач математической физики. Работы Н.Н. Яненко были широко известны и имели высочайший рейтинг за рубежом. У него были многочисленные творческие контакты с ведущими учеными мира, он активно участвовал в рабочей группе ИФИП.

Значительную роль в «интеллектуализации математики» в ВЦ СОАН сыграл С.К. Годунов. Большая группа авторов – его учеников – А.Г. Антонов, А.Я. Булгаков, О.П. Кирилук, В.И. Костин, А.Н. Малышев, перешедшие позже в Институт математики СО РАН, разработали серию уникальных алгоритмов вычислительной алгебры, вошедших в библиотеку программ ПОЛИНА, реализующую матрично-векторные задачи с гарантированной (!) точностью на основе предварительного анализа спецификаций конкретной ЭВМ и свойств устойчивости или неустойчивости каждого расчетного этапа.

Интересные исследования были проведены С.К. Годуновым с коллегами по построению адаптивных сеток для многомерных краевых задач со сложными конфигурациями кусочно-гладких границ. В основу методологии он положил человеческий фактор: стремление строить «красивые» с точки зрения математика-эксперта сетки. Понятно, что такой субъективный подход достаточно сложно формализовать, однако его экспериментальная апробация демонстрировала хорошие результаты. Годуновские идеи были реализованы В.Л. Катковым в демонстрационной версии сеточного генератора.

В лаборатории автоматизации построения алгоритмов, в которую после 1968 г. вместе с В.П. Ильиным пришли новые люди – Б.И. Голубцов, В.М. Свешников, Е.А. Ицкович, А.Л. Урванцев, С.П. Гололобова, В.Я. Иванов, Н.И. Горбенко, А.Н. Юдин, М.В. Урев, В.А. Катешов и др. – за долгие годы коллективной работы было фактически создано направление вычислительной электрофизики, включающее задачи моделирования высоковольтной аппаратуры, электронно-оптических и полупроводниковых приборов, ускорителей, электронных и ионных пушек, средств сильноточной СВЧ-электроники и т. д. Для расчетов различного типа устройств были разработаны программные пакеты КСИ-БЭСМ, ЭРА, ЭФЕС, ЭФИР, ЭДС и др., осуществляющие автоматизацию всех этапов вычислительного процесса: двумерное и трехмерное геометрическое моделирование, построение сеток и аппроксимаций в сложных расчетных областях, линейные и нелинейные итерационные процессы, а также средства интеллектуального графического интерфейса с управлением численными экспериментами. Пользователями этих пакетов были более 100 организаций из городов и республик СССР, в значительной степени из оборонных министерств.

С точки зрения важной практической задачи с высоким уровнем интеллектуальной сложности можно привести пример реализованного В.А. Катешовым крупномасштабного вычислительного эксперимента по многопараметрической оптимизации электронно-оптического преобразователя (ЭОП), лежащего в основе прибора ночного видения. Проблема заключалась в нахождении физических режимов и геометрической конфигурации электродов с достаточно сложной топологической структурой, которая обеспечивает требуемые оптические характеристики прибора при заданных инженерных ограничениях на его конструктивные особенности. Более конкретно, требовалось провести глобальную минимизацию целевого функционала, имеющего овражный характер и выражаемого через аберрации оптического

изображения до третьего порядка включительно при достаточно жестких линейных и нелинейных ограничительных условиях на оптимизируемые параметры.

Такая проблема могла быть решена только с помощью мета-алгоритма на основе формирования последовательно выполняемых расчетных сеансов при взаимодействии ЭВМ с живыми экспертами, динамически переформировывавшими локальную задачу оптимизации на основе анализа промежуточных результатов. Каждый такой сеанс (как правило, ночной) на машине М-220 длился около пяти-семи часов, а общее их число составило несколько десятков. В итоге задача была решена, на основе расчетных данных создали прибор, эксплуатационные характеристики которого соответствовали проектным. Этот уникальный результат был достигнут как итог многолетних исследований, по результатам которых была опубликована монография, по просьбе иностранных специалистов переведенная на английский язык.

### III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВЫЗОВЫ И ПРОБЛЕМЫ XXI ВЕКА

После наступления нового тысячелетия в компьютерном мире продолжал действовать закон Мура, одного из основателей компании Интел: увеличение вычислительных мощностей в 1000 раз за 11 лет. Этот экспоненциальный рост относится и к суперкомпьютерным рекордсменам, и к средним показателям мирового списка лидеров ТОП-500. При этом почти одинаково растет и объем оперативной памяти: одному терафлопсу, например, соответствует приблизительно один терабайт запоминающих устройств. Существуют и другие интерпретации закона Мура. Очень важная деталь: существующие темпы относятся и к увеличению плотности размещения элементной базы, что ведет к миниатюризации персональных компьютеров и мобильных устройств, результатом чего являются массовые информационные технологии с огромными социальными последствиями для цивилизации. Все эти аспекты составляют материальную базу ускорения прогресса в искусственном интеллекте. Конечно, скоро наступит насыщение роста традиционной микроэлектроники, в силу непреложных физических законов. Однако уже на пороге появления квантовых компьютеров, что означает очередной кардинальный скачок возможностей человечества.

В 2008 г., после пришествия первого в мире петафлопсника, Дж. Донгарра вместе с ведущими экспертами сформировал проект *International Exascale Software Project (IESP)* и опубликовал «дорожную карту» для суперкомпьютерного сообщества, в которой была сформулирована сверхзадача: разработка огромных объемов программного обеспечения нового поколения, создание которого возможно только на основе широкой кооперации.

За десятилетия существования ЭВМ накоплены огромные объемы программного обеспечения, представляющего неоценимый интеллектуальный потенциал. Мы остановимся на прикладных разработках, существующих в различных формах и представляющих невообразимый «зоопарк»: дорогие коммерческие продукты и открытые изделия (*Open Source*), огромные программные комплексы, библиотеки, проблемно-ориентированные пакеты и отдельные вычислительные модули. Всё это составляет многомиллиардный рынок, но зачастую функционирует в Интернете как полулегальный «базар».

В последние годы профессиональное сообщество наметило переход к интегрируемым вычислительным окружениям (ИВО), составляющих методо-ориентированные экосистемы для решения междисциплинарных прямых и обратных задач математического моделирования процессов и явлений в самых разнообразных сферах человеческой деятельности. Примерами таких проектов являются *DUNE (Distributed Unified Numerical Environment)*, *Open FOAM* и *INMOST* (разработка ИВМ РАН им. Г.И. Марчука), информация о которых доступна в Интернете. В ИВМиМГ СО РАН много лет ведутся работы по Базовой системе моделирования (БСМ) [18], предназначенной для поддержки всех основных стадий крупномасштабного вычислительного эксперимента, включая формирование математической постановки, дискретизацию многомерных задач, аппроксимацию решаемых дифференциальных и/или интегральных уравнений, реализацию алгебраических систем, обработку и визуализацию расчетных данных, методы оптимизации для обратных задач, анализ полученных результатов и принятие решений.

Концепция БСМ заключается в том, что каждый из перечисленных этапов реализуется автономной подсистемой, взаимодействующей с другими посредством согласованных структур данных: геометрических, функциональных, сеточных, алгебраических и т.д. Функциональное наполнение этих стадий основывается на развитой интеллектуальной оболочке, рассчитанной на автоматизацию построения высокоэффективных алгоритмов с целью кардинального повышения производительности труда математиков-программистов. Необходимо отметить, что в современных МВС выполнение коммуникационных операций не только замедляет вычислительный процесс, но и является весьма энергозатратным, что существенно сказывается на эксплуатационных расходах. Отсюда возникает

математическая проблема построения алгоритмов с минимальным объемом запоминаемых данных, что приводит к предпочтению использования методов повышенной точности. Такие подходы зачастую приводят к громоздким и трудно программируемым формулам, но в этом человеку должны помочь существующие интеллектуальные инструменты.

В составе ИВО, помимо БСМ, предлагается достаточно развитое системное наполнение, в целом такой проект должен удовлетворять следующим техническим требованиям: гибкое расширение состава реализуемых моделей, применяемых алгоритмов и технологий; адаптация к эволюции компьютерных платформ; унифицированные структуры данных и эффективное переиспользование внешних программных продуктов, интеллектуальные внутренние и пользовательские входные/выходные интерфейсы; согласованное участие различных групп разработчиков. Соблюдение перечисленных условий призвано обеспечить длительный жизненный цикл проекта и его востребованность со стороны широкого круга разнопрофильных пользователей.

Одним из главных компонентов ИВО, включающим за его интеллектуальные возможности, должна быть БАЗ – база алгоритмических знаний, которая может поддерживать максимальную эффективность работы всем ее клиентам: разработчикам (математикам и программистам), конечным пользователям с разной профессиональной подготовкой, административному персоналу. Это включает верификацию и тестирование кода, документирование, технологическое сопровождение и консультирование, выполнение заказных расчетов, работы по развитию всей системы и т.д. Образно говоря, в БАЗ должны быть все информационные и инструментальные компоненты, среди них: классифицированная библиография и глоссарий, многоверсионная библиотека (фонд) алгоритмов и программ, пользовательская документация с примерами использования, архив расчетных данных с результатами решения задач, средства для пополнения библиотечных и информационных компонент, экспертная система и/или средства принятия решений, инструменты машинного обучения технологиям моделирования, средства выбора алгоритмов для решения конкретных задач, инструменты отладки, верификации, валидации и тестирования программ, фабрика пользовательских интерфейсов, средства взаимодействия с внешними продуктами, в том числе с САПРовскими разработками (*CAD, CAE*); коммуникационные инструменты для взаимодействия с внешним миром.

Рассмотренные проекты ИВО и БАЗ очевидным образом меняют масштаб разработки, которая не может быть реализована одной группой и требует длительной координации вычислительного сообщества. Для такой кооперации необходима глубокая специализация с участием как производственных команд программистов, так и реализаций академического характера и, кроме того, учебных версий кода со своими специфическими требованиями. Отметим, что прообразом БАЗ в информационном плане является разработанный под руководством Дж. Донгарры и В.В. Воеводина проект AlgoWiki [19], а особенности создания распределенных вычислений рассматриваются в работе [20].

Последние два десятилетия исследования в области искусственного интеллекта в Новосибирском Академгородке, Иркутске, Красноярске и Томске ведутся достаточно широким фронтом. В ИСИ СО РАН сотрудниками основанной А.С. Нариньяни лаборатории активно продолжаются работы по системам принятия решений и экспертным системам [21-22]. В Институте математики СО РАН уже много лет специалистами по математической логике (Ю.Л. Ершов, С.С. Гончаров, Д.И. Свириденко) на основе результатов теоретических исследований разрабатываются актуальные прикладные вопросы семантического моделирования [23]. В Институте вычислительных технологий (ФИЦ) и в НГУ ведутся интересные работы по лингвистическим проблемам (В.П. Баракнин, Д.Е. Пальчунов). В ИВМиМГ СО РАН активно ведутся исследования по ИИ в лабораториях вычислительной физики, суперкомпьютерного моделирования и синтеза параллельных программ [24-27], недавно сформирована Лаборатория искусственного интеллекта во главе с М.А. Марченко, ориентированная на экологические и другие серьезные приложения.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Приведенный исторический обзор свидетельствует, что «сибирский искусственный интеллект» имеет глубокие корни и хорошие предпосылки для дальнейших исследований как в методическом плане, так и в смысле технологических разработок для актуальных приложений. Следует признать, что в этой области еще требуется профессиональное, в первую очередь математическое, осмысление ряда понятий, ставших обыденными в средствах массовой информации, но не получили строгих определений и конкретных содержаний. Примерами могут служить такие категории, как «цифровизация», «двойники», «трансформация», «нейросеть», «машинное обучение».

Последний термин, в частности, перекликается с «суррогатной оптимизацией», основанной на быстром предсказательном моделировании (возможно, сначала достаточно приблизительном, с

возможностью последующего уточнения) изучаемого объекта или процесса на основе статистической и/или эмпирической обработки большого объема данных, как экспериментально измеряемых, так и расчетных. Такой подход подразумевает этап «обучения» компьютерной модели, когда предварительно насчитывается и запоминается большое количество пробных вариантов, которые затем оперативно анализируются для принятия экспертного решения. Эта методология может означать компромисс между технологиями *big data*, или «*data science*», с классическим математическим моделированием [28, 29]. С другой стороны, этот принцип использования накопленного человеческого опыта для решения интеллектуальных задач перекликается с идеями Г.С. Альтшуллера [17] о создании технологии изобретательной деятельности.

Глобализация возможностей суперкомпьютерного моделирования на основе интеллектуальной обработки огромных объемов данных уже выходит за рамки научно-технологических проблем и начинает привлекать внимание крупного бизнеса, а также государственных и политических деятелей. Большую собственную программу по искусственному интеллекту объявил руководитель СБЕРА Г.О. Греф, а организованная им в ноябре прошлого года Международная конференция AI Journey 2022 явилась беспрецедентной по составу участников – ученых и высокопоставленных персон. В качестве примера важного общественного внимания к ИИ можно также привести статью бывшего Госсекретаря США Г. Киссинджера, опубликованную в журнале *The Atlantic* (2018 г.), в которой он пишет о влиянии ИИ на международную политику и рассматривает сегодняшнюю действительность с философской и исторической точки зрения как завершение основанной на разуме эпохи Просвещения.

Если говорить о Новосибирском Академгородке, где присутствуют различные науки и технологии, то здесь возникает уникальная возможность воплотить на компактной территории глобализацию интеллектуального моделирования, когда унифицированные математическое и программное обеспечение играют роль кровеносной или лимфатической системы с кардинальным ускорением эффективности фундаментальных и прикладных исследований. Эта идеальная картина, естественно, требует кропотливой организационной работы и устойчивого развития внешней социальной среды. Данные сферы деятельности, в принципе, тоже можно промоделировать и оптимизировать, но пока эту тему следует обсуждать только абстрактным образом, поскольку здесь мы вторгаемся в область социальных и гуманитарных проблем, где остаются открытыми даже вопросы существования корректных моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин В.П. Вычислительная информатика – открытие науки. Новосибирск: Наука: Сиб. отделение, 1991. 197 с.
2. Ильин В.П. Сибирская информатика: школы Г.И. Марчука, А.П. Ершова, Н.Н. Яненко // История информатики в России. Ученые и их школы. М.: Наука, 2003. С. 340-363.
3. Il'in V. Parallel intelligent computing in algebraic problems // Sokolinsky, L., Zymbler, M. (eds.) *Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science*. 2021. V. 1437. Springer, Cham.
4. Il'in V. Artificial intelligence problems in mathematical modeling // Voevodin V., Sobolev S. (eds.) *RuSCDays 2019. CCIS*. 2019. V. 1129. P. 505-516. Springer, Cham.
5. Forrester A., Sobester A., Keane A. *Engineering Design via Surrogate Modeling: A Practical Guide*. New York: Wiley, 2008.
6. Delfour M., Zolesio J.-P. *Shape and Geometries: Metrics, Analysis, Differential Calculus, and Optimization*. Philadelphia: SIAM Publ., 2011.
7. Cottrell J., Hughes T., Bazilevs Y. *Isogeometric Analysis: Towards Integration of CAD and FEA*. Singapore: Wiley, 2009.
8. Микони С.В. Формализация познавательного процесса на основе базиса моделей // *Онтология проектирования*. 2018. Т. 8. № 1 (27). С. 25-48.
9. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // *Nature*. 2015. Vol. 521. Pp. 436-444.
10. Weinan E. Machine learning and computational mathematics // *Commun. Comput. Phys.* 2020. Vol. 28. Pp. 1639-1670.
11. Боргест Н.М. Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения // *Онтология проектирования*. 2013. № 3 (9). С.9-31.
12. Kleppe A. *Software language engineering: Creating domain-specific language using metamodels*. NY: Addison-Wesley, 2008.
13. Liao X., Lu K., Yang C., et. al. Moving from exascale to zettascale computing: challenges and techniques // *Front. Inform. Technol. Electron. Eng.* 2018. Vol. 19. No 1. Pp. 1236-1244.A.
14. Luccioni A., Bengio Y. On the Morality of Artificial Intelligence // arXiv:1912.11945 [cs.CY]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.11945>.



15. Dongarra J., Grigori L., Higham N.J. Numerical algorithms for high performance computational science, 2020. Vol. 378. Iss. 2166. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0066>.
16. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б. Неопределенные модели Нариньяни: становление, применение, проблемы и перспективы // Труды SoRuCom-2020. С. 126-132.
17. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Новосибирск: Наука, 1986. 209 с.
18. Il'in V. The integrated computational environment for optimization of complex systems // Proceedings of the 15th International Asian School-Seminar «Optimization Problems of Complex Systems» (OPCS 2019). Pp. 65-67. <https://doi.org/10.1109/opcs.2019.888015>.
19. Antonov A., Dongarra J., Voevodin V. AlgoWiki Project as an Extension of the Top500 Methodology // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2018. Vol. 5. No 1. Pp. 4-10.
20. Feoktistov A., Kostromin R., Sidorov I.A., Gorsky S.A. Development of distributed subject-oriented applications for cloud computing through the integration of conceptual and modular programming // Proc. of the 41st Intern. Conf. on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2018). Pp. 234-239.
21. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б. Онтологический подход к разработке системы поддержки принятия решений на нефтегазодобывающем предприятии // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2012. Т. 10. Вып. 1. С. 121-128.
22. Zagorulko Y., Zagorulko G. Architecture of extensible tools for development of intelligent decision support systems // New Trends in Software Methodologies, Tools and Techniques. Proc. of the 10th SoMeT\_11. Hamido Fujita (Eds.). Amsterdam: IOS Press, 2011. Pp. 457-466.
23. Goncharov S.S., Sviridenko D.I. Logical language of description of polynomial computing // Doklady Mathematics. 2019. Vol. 99. Iss. 2. Pp. 121-124.
24. Malyshkin V.E. Active knowledge, LuNA and literacy for oncoming centuries // LNCS. 2015. Vol. 9465. Pp. 292-303.
25. Il'in V.P., Skopin I.N. About performance and intellectuality of supercomputer modeling // Programming and Computer Software. 2016. Vol. 42. Iss. 1. Pp. 5-16.
26. Glinitskiy B., Kulikov I., Sapetina A., Zagorulko Y., Zagorulko G. The creation of intelligent support methods for solving mathematical physics problems on supercomputers // Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 1129. Pp. 427-438.
27. Gorodnichev M., Lebedev D. Semantic tools for development of high-level interactive applications for supercomputers // J. Supercomp. 2021. Vol. 77. Iss. 10. Pp. 11866-11880.
28. Бурнаев Е.В., Бернштейн А.В., Оселедец И.В. и др. Фундаментальные исследования и разработки в области прикладного искусственного интеллекта // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 508. С. 19-27.
29. Турдаков Д.Ю., Аветисян А.И., Оселедец И.В. и др. Доверенный искусственный интеллект: вызовы и перспективные решения // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 508. С. 13-18.