

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФИЛОСОФИЯ НАУКИ

© 2018 г. В.П. Ильин

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

e-mail: ilin@sscc.ru

Поступила в редакцию 16.06.2017

В статье рассматриваются философско-методологические аспекты предсказательного математического моделирования, становящегося в эпоху технологических вызовов постиндустриального общества третьим путём познания, дополняющим и объединяющим классическую теорию и натурный эксперимент. Автором описываются концептуальные, архитектурные и технологические проблемы создания интегрированного программного окружения для высокопроизводительного решения междисциплинарных прямых и обратных задач нового поколения на многопроцессорных вычислительных системах петафлопсного уровня с масштабируемым параллелизмом. Раскрываются тенденции развития “неоинформатики” с внедрением когнитивных принципов в автоматизацию построения моделей и алгоритмов, в создание систем принятия решений для широкого круга пользователей из разных производственных и социальных сфер. Предлагаются конструктивные и инфраструктурные принципы разработки открытой базовой системы моделирования, поддерживающей все основные стадии наукоёмкого компьютерного эксперимента и ориентированной на эффективный длительный жизненный цикл и согласованное развитие различными группами разработчиков.

**Ключевые слова:** высокопроизводительные вычисления, математические модели, алгоритмы, третий путь познания, технологические стадии моделирования, интегрированное инструментальное окружение, архитектура прикладного программного обеспечения.

DOI: 10.7868/S0869587318010073

**Математическая шкатулка Пандоры.** Проблема осмысления и предназначения математики, казалось, была решена ещё великим Галилеем, объявившем, что “физика говорит языком математики”. Однако в XXI в. человечество оказалось ввергнутым в водоворот технологических революций, и математика, скромная служанка всех наук, в паре

с информатикой начала превращаться из золушки во властную царицу. Сегодня человек становится жертвой гонки мобильных гаджетов, экспансии социальных сетей Интернета, компьютерной игромании, кибертерроризма и прочих виртуальных реальностей. И это только начало грандиозных трансформаций, ибо наступившая эпоха постпетафлопсных суперкомпьютеров и грядущий приход “эксафлопсников” с немислимыми  $10^{18}$  операциями в секунду чреватой новой постиндустриальной эпохой с “облачными” вычислениями, цифровым проектированием, 3D-принтерами, военными игровыми стратегиями, “умными” домами и городами, электронными правительствами и прочими инновациями, призванными перевернуть наши представления об окружающей действительности.

Ф. Гойя в своей серии рисунков “Капричос” показал ужасающую картину того, как “сонм Разума рождает чудовищ”. В подобной ситуации необходимо привлечь, по рецепту Эркюля Пуаро, ресурсы



ИЛЬИН Валерий Павлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, профессор НГУ и НГТУ.

“серого вещества” и взвешенно проанализировать роль науки в порождении тенденций, характеризующих “этот безумный, безумный мир” (как точно сформулировал знаменитый кинорежиссёр С. Крамер). В рамках данной статьи задача конкретизируется следующим образом: нас будут интересовать философские аспекты математического моделирования процессов и явлений различной природы, так как именно здесь сосредоточивается огромный потенциал научно-технологического прогресса. Прежде чем приступить к рассмотрению заявленной темы, необходимо предпринять хотя бы краткий исторический экскурс, а также оговорить дефиниции ключевых понятий.

*Математическое моделирование* — это изучение процессов и явлений математическими методами. Каждая из используемых в приведённом определении категорий требует своего содержательного раскрытия. Процессы и явления подразумеваются в первую очередь реальные — технические, естественные или социальные. В качестве примеров можно назвать производство металла и новых материалов, природные или техногенные катастрофы и демографическую динамику. Однако актуальным является также изучение и абстрактных моделей, представленных чисто математическими объектами. Более того, в действительности так и происходит: физическая (химическая, биологическая и т.д.) модель представляется некоторой математической моделью, в которой практически всегда пренебрегают какими-то малозначимыми эффектами. Грамотное построение модели составляет задачу *моделлера* (англ. “modeller” — уже употребляемое обозначение специалиста, занимающегося моделированием в конкретной прикладной области).

Следующее понятие, с которым нам предстоит работать, чрезвычайно ёмкое и вызывающее нешуточные дискуссии, — *математика*. Академик В.И. Арнольд горячо боролся за единство теоретической математики и теоретической физики, которые он отождествлял. При этом он фактически не признавал вычислительной математики и информатики, называя их в своих полемических работах “ремесленничеством”. Принципиальным, хотя и зочным, оппонентом В.И. Арнольда был А.П. Ершов, автор таких ставших азбучными терминов, как “компьютерная грамотность” и “школьная информатика”, с гордостью говоривший о себе: “Я — математик”. В данной статье мы будем понимать под математикой триединую структуру, включающую теоретическую математику, вычислительную математику и математическое моделирование. Это деление на три составляющие полностью соответствует самому общему определению математики как науки о математических объектах, хотя, конечно, полное право на существование имеют и такие распространённые понятия, как “прикладная

математика”, “вычислительная информатика”, “вычислительная геометрия”, “топология” и т.д. В англоязычной литературе общеупотребительным является словосочетание “computer science”, дословный перевод которого — вычислительные науки, плохо приживается в русском языке. Завершая терминологические пояснения, следует упомянуть и о таких многочисленных названиях, как “вычислительная физика”, “вычислительная химия”, “вычислительная биология” и др. Данные дисциплины следует классифицировать, скорее, как применение математического моделирования к тем или иным предметным областям.

Возникновение истории математического моделирования следует отнести, по крайней мере, к тем незапамятным временам, когда египетские жрецы предсказывали солнечные и лунные затмения, что не могло быть сделано без хитроумных вычислений. Если говорить о классификации знаний, то изначально существовала только одна наука — философия, разделение по специальностям началось в средние века после появления алхимиков и метафизиков, однако по традиции даже в наши времена все европейские научные степени звучат как “доктор философии”. В дальнейшем естественные науки выделились в самостоятельные бурно развивающиеся направления, которые порождали свои индустриальные эпохи, а философы, благодаря великим личностям — Ф. Бэкону, И. Канту, Г. Гегелю, Б. Расселу, Н.А. Бердяеву и многим другим, осмысливавшим взаимосвязанные процессы познания, развития экономики, техники, социальных структур и личности, стали генераторами общегуманных идей.

Со второй половины XX в. роль научно-технического прогресса кардинально изменилась: в результате фундаментальных исследований в мире появилось ядерно-ракетное оружие, которое не только имело политические последствия, но и сделало актуальным вопрос о самом существовании человечества. Данную проблему удалось решить на принципах взаимосдерживающего паритета, однако гамлетовская дилемма “быть или не быть?” сохраняет свою актуальность как минимум на ближайшие десятилетия. Нельзя не привести пример использования математического моделирования в области ядерной безопасности. В 1996 г. ядерными державами был заключён договор о всеобщем запрещении испытаний атомного оружия. Последней ратифицировала это соглашение Франция, и то только после завершения программы по моделированию с высокой степенью достоверности ядерных испытаний на компьютере. Более того, ни для кого не секрет, что во всех странах “ядерного клуба” это оружие непрерывно совершенствуется, но натурные испытания полностью заменены вычислительным экспериментированием.

В последние десятилетия цивилизованное сообщество оказалось ввергнутым в новую техногенную революцию, на этот раз связанную с бурной компьютеризацией. На протяжении 50 лет с высокой точностью выполняется так называемый закон Мура (одного из основателей компании Intel), согласно которому мощность ЭВМ увеличивается в 1000 раз за каждые 11 лет. В 2008 г. человечество вступило в эру постпетафлопсных компьютеров ( $10^{15}$  арифметических операций в секунду, или флопс), а в 2019 г. в соответствии с законом Мура ожидается пришествие “эксафлопсника”, в котором будут уже сотни миллионов и миллиарды вычислительных устройств. Это приведёт к переходу количества в качество и перевернёт наши представления о супервычислениях. Поразительно, что экспоненциальный рост быстродействия не выходит на ожидаемое насыщение, и закон Мура продолжает выполняться: в 2016 г. китайский Sunway Taihu Light возглавил список ТОП-500 мощнейших в мире компьютеров со значением более 125 петафлопс, то есть для достижения прогнозируемого на 2019 г. показателя  $10^{18}$  операций в секунду осталось повысить производительность всего лишь в 8 раз.

В военной истории извечно противостояние щита и меча: развитие наступательных и оборонительных вооружений тесно переплетается. В научно-технической сфере картина такая же: с появлением суперкомпьютеров одновременно возникают суперзадачи, “аппетит приходит во время еды”. XXI столетие отличается фантастическим прогрессом всех наук и технологий, и через два-три десятилетия человечеству предрекают технологическую сингулярность с неисчерпаемой энергетикой, новыми материалами, вечной молодостью и даже бессмертием. Так или иначе, но грядущие проблемы не могут быть решены без суперкомпьютерного моделирования. Оно становится третьим путём познания и, в полном согласии с предсказанием академика М.А. Лаврентьева, которое он сделал 50 лет назад, уже является посредником между теоретическими и экспериментальными исследованиями.

За последние 20 лет человечество пережило два потрясения, резко изменившие все производственные, общественные и личные отношения, — появление Интернета и затем мобильного телефона. Зададимся вопросом: а что будет третьим технологическим шоком? Наш прогноз — глобальное моделирование. Аргументы просты. Первые два “катаклизма” были связаны с информационной стороной компьютерной эволюции. Действительно, рост быстродействия ЭВМ примерно пропорционален увеличению объёма оперативной памяти и пропускной способности каналов передачи данных, и именно их огромные возможности легли в основу новых информационных технологий. Однако при этом фактически забылось, что ЭВМ изначально

задумывалась для вычислений, а не для работы с большими данными (big data). Именно фантастический потенциал высокопроизводительных вычислений (широко распространённая аббревиатура НРС — High Performance Computing) призван стать катализатором предсказательного высокоразрешающего моделирования как для получения новых фундаментальных знаний во всех без исключения науках, так и в плане создания нового поколения производственных технологий при переходе к ожидаемому футурологами VI экономическому укладу. Здесь уместно привести широко цитируемую фразу бывшего президента Совета по конкурентоспособности США Д. Винс-Смит: “Страна, желающая победить в конкуренции, должна победить в вычислениях”.

Настоящая статья имеет философско-методологическую направленность, но никак не претендует на профессиональное философское осмысление проблем научного познания, по которым имеется обширная литература [1–4]. Общезначимые проблемы математики и моделирования также обсуждаются, в том числе в работах [5–16]. Нельзя также не отметить, что исключительное значение для понимания изучаемой проблематики имеет научно-организационное наследие академика Г.И. Марчука, глубокое обобщение уникального опыта которого отражено в его посмертном издании [17].

“Что есть истина?” — по преданию, именно с такими словами обратился римский прокуратор Иудеи Понтий Пилат к мятежному Христу. Сомневающийся Пилат принял роковое решение и, снимая с себя ответственность, символически умыл руки.

Два понятия, раскрывающиеся в этой драме, имеют ключевое значение для математического моделирования — “истина” и “принятие решения”. Первая категория обладает очень богатым содержанием и характеризует результаты человеческого познания. Целью и содержанием моделирования выступает изучение процессов или явлений, которые можно обозначить философской категорией “объект”. Напомню, что знание может быть абсолютным или относительным. Последнее означает, что наши сведения об исследуемом объекте или предметной области являются приближёнными, за отдельными исключениями, которые лишь подтверждают общее правило. Например, дилемма, занимающая умы лучших физиков-теоретиков в последние десятилетия — существует ли бозон Хиггса? От ответа на этот вопрос зависит признание или отрицание так называемой Стандартной модели, определяющей фундаментальные представления о структурах и взаимодействиях микромира и Вселенной. Другая наглядная иллюстрация — задача о распознавании образов, относящаяся к области

информатики, но имеющая самые различные приложения: обработка космических, сейсмических и других больших объёмов данных, идентификация объектов (“свой”, “чужой” или принадлежащий к какой-то группе), противоракетная оборона, автоматический анализ текстов, речевых сигналов и т.д.

Как правило, рассматриваемые объекты характеризуются некоторыми количественными показателями: пространственными размерами и формами, временными интервалами и скоростями, массами и плотностями субстанций, а также другими свойствами, которые могут быть измерены в тех или иных единицах. Здесь уже нельзя обойтись без определения *погрешности*, или *точности*, представления модели. Какая-то количественная характеристика  $\varphi$  изучаемого объекта может быть принята за точное, или истинное, значение в отличие от приближённого значения  $\tilde{\varphi}$ , получаемого в результате моделирования. В нашем случае это будет компьютерный эксперимент, зачастую включающий решение сложной вычислительной задачи, а *абсолютной погрешностью* полученного численного результата будет разность  $\delta = \varphi - \tilde{\varphi}$ . Если ошибка  $\delta$  достаточно мала, то моделирование как инструмент познания даёт хорошее описание объекта (можно сказать, высокую точность или разрешение, или предсказательность), а в противном случае – плохое. Мы не будем сосредотачиваться на математических строгостях и формализмах о классах функций  $\varphi$  и  $\tilde{\varphi}$ , нам важно продемонстрировать философское утверждение, что путь к истине нелёгок и нескор. Прежде всего отметим тот принципиальный факт, что понятие приемлемости (или неприемлемости) метода по точности является относительным. Можно говорить, что один из методов точнее другого, но нельзя провести чёткую границу, разделяющую методы на годные и негодные (мы сейчас ничего не говорим о цене метода, на этом важном вопросе остановимся позже). Далее, величина  $\varphi$ , которая принимается нами за реальную характеристику объекта, определяется из натуральных наблюдений и измерений, поскольку практика, как известно, – критерий истины. Однако сами измерения неизбежно проводятся с погрешностями, которые могут быть значительными, и совершенствование методик получения надёжных результатов в различных предметных областях формирует отдельные актуальные научные направления. При этом натурные эксперименты иногда слишком затруднительны или даже невозможны, и тогда приходится привлекать “внутренние” критерии достоверности моделирования. Типичный подход заключается в использовании различных моделей изучаемого объекта, в том числе иерархических, и сопоставлении результатов отдельных численных экспериментов.

Погрешность моделирования в целом складывается, по крайней мере, из трёх компонент:

$$\delta = \delta_n + \delta_m + \delta_c,$$

где  $\delta_n$  – ошибка предметной модели (например, физической),  $\delta_m$  – ошибка математической модели,  $\delta_c$  – погрешность вычислительной модели. Так, в задачах гидродинамики иногда пренебрегают вязкостью или изменением плотности и температуры среды, что намного упрощает проблему, но может приводить к появлению ошибки физической модели  $\delta_n$ . Принципиально то обстоятельство, что различные числовые данные, определяющие материальные и геометрические свойства объекта, как правило, известны приближённо.

Для уже выбранной предметной модели можно использовать различные математические постановки: в решаемом функциональном уравнении  $L\Phi = F$  оператор  $L$  может быть дифференциальным или интегральным либо же иметь вариационную форму; описания его коэффициентов и области определения также могут отличаться, обуславливая различные величины  $\delta_m$ . Например, в задачах прогноза погоды используется огромный объём метеорологической и космической информации, и проблема “усвоения данных”, чтобы они не противоречили используемой модели, – серьёзное направление научных исследований. Надо также иметь в виду, что решение  $\Phi$  математического уравнения представляется функциями (давления, плотности, температуры и т.д.), зависящими от пространственных координат и времени, а величина  $\varphi = \varphi(\Phi)$  – это другой функционал, получаемый в результате каких-то косвенных измерений. Квалифицированное сопоставление  $\varphi$  со значениями  $\Phi$  – вопрос, требующий особой компетенции.

Численная погрешность  $\delta_c$  зависит от многих факторов: способа дискретизации исходной непрерывной задачи, метода аппроксимации функциональных уравнений алгебраическими, вычислительной устойчивости применяемых алгоритмов, особенностей конкретной машинной арифметики. Проведение расчётов с необходимой (и достаточной) для практики точностью  $\delta_c$  – прерогатива современной вычислительной математики. Её основатель академик и адмирал российского флота А.Н. Крылов ещё 100 лет назад учил, что проводить расчёты с излишне скрупулёзной точностью – грубая профессиональная ошибка, поскольку при этом удорожается работа. Особенность численных методов – применение семейства алгоритмов, которые зависят от счётных параметров, определяющих погрешность результата. Типичным является построение в расчётных областях достаточно густых сеток с характерным шагом  $h$  и применение на них методов аппроксимации исходных

уравнений – таких, что при  $h \rightarrow 0$  асимптотически ошибка пропорциональна величине  $h^\gamma$ , где константа  $\gamma > 0$  называется порядком алгоритма. Тогда при измельчении сетки имеется *сходимость метода*, то есть приближённое решение  $\Phi$  стремится к истинному  $\Phi$ , а ошибка  $\delta$  может стать теоретически сколь угодно малой.

**От знания к мудрости.** Существует расхожее мнение, что западная цивилизация базируется на знаниях, а восточная – на мудрости, причём последнее понятие подразумевает действия, основанные на личном или чужом опыте. Переходя к рассмотрению второй категории, на которую мы обратили внимание в истории с Понтием Пилатом, – “принятие решения”, поместим альтернативу “знание–мудрость” в контекст современных проблем моделирования, а не культурно-географических различий.

Непосредственной целью моделирования выступает или получение новых фундаментальных знаний (здесь уместно вспомнить поговорку “нет ничего более практичного, чем хорошая теорема”), или изучение свойств всевозможных процессов/явлений – научно-технических, природных, социальных. Однако получение знаний – не самоцель, “сухим остатком” моделирования должны быть именно какие-то решения, характер которых определяется конкретной областью деятельности. Компьютеризация интеллектуальной сферы принятия решений – очень заманчивая идея, подходы к её реализации заключаются в построении *систем принятия решений* [18]. Здесь можно вспомнить и такую смелую задумку, как попытка построить теорию решения изобретательских задач [19].

Поскольку математика – одновременно и служанка, и царица всех наук, её универсальный язык применим практически везде. Давно известно, что уровень развития любой отрасли определяется степенью её математизации, а сегодня можно смело добавить, что и компьютеризации. Иначе как счастливым обстоятельством не назовёшь тот факт, что с помощью относительно небольшого набора основных математических объектов и операций над ними – всего лишь в пределах нескольких десятков – можно описывать самые различные процессы и явления. Например, одно из относительно простых и широко известных уравнений, носящее имя французского математика С.Д. Пуассона, успешно используется для решения задач теплопроводности, диффузии, электромагнетизма, газодинамики и т.д. Конечно, специалисты из перечисленных научно-технических областей имеют разную профессиональную подготовку и даже психологию, и чтобы каждому из них моделирование приносило существенную практическую пользу в качестве математической инновации, надо

проделать большую подготовительную работу. Необходимо понимать, что фактическим инструментом для рассматриваемого абстрактного пользователя выступает компьютер с работающими на нём программами. Конкретные представления этих технологий имеют огромное значение (дьявол кроется в деталях).

Возрастание общепознавательной роли моделирования в английской литературе отражается в появлении новых понятий: “simulation”, “data mining”, “deep knowledge”, “digital design” и т.д., которые, как и упомянутой выше термин “computer science”, пока не нашли в русском языке популярных аналогов. Однако в целом наблюдаемые тенденции свидетельствуют о формировании нового поколения науки о знаниях, разрабатывающей собственные когнитивные технологии и онтологические принципы (см. обзор в [20]), совершенствующей средства искусственного интеллекта. Искусственный интеллект заслуживает особого внимания. Понятно, что ЭВМ без человека ничто, и работает машина только по предписанной программе. Однако при немыслимом росте компьютерных ресурсов – памяти и вычислительной мощности – слабым звеном стало катастрофическое отставание производительности труда программистов, которое можно классифицировать как мировой кризис программирования, в особенности прикладного. Единственный видимый “свет в конце туннеля” – качественный рост уровня автоматизации построения математических моделей и алгоритмов, так или иначе связанный с созданием “фабрики языков” естественного типа. В яркой и остроумной книге А. Клеппе [21] данная парадигма обозначена как переход от “палеоинформатики” к “неоинформатике”.

Мы не будем задаваться сакраментальным вопросом, может ли машина мыслить, поскольку нас интересует более приземлённая проблема: можно ли построить систему моделирования, которая решала бы с высокой производительностью широкие классы актуальных задач? Ответ на этот вопрос сразу напрашивается резко отрицательный, поскольку универсальность и эффективность всегда находились в антагонистических отношениях. Однако в следующем разделе мы увидим, что зачастую труднодостижимых целей можно достичь, посмотрев на проблему и на подходы к ней с неожиданной стороны.

**Технологии решают всё.** Чтобы сделать моделирование эффективным инструментом получения новых фундаментальных знаний и реальной производительной силой, необходимо провести огромную работу в сфере наукоёмкого программирования, вычислительно-информационных технологий и, что не менее важно, создания современных

организационных структур со взаимодействием разнородных коллективов разработчиков и пользователей. Особенность нынешней ситуации обуславливает невозможность совершенствовать моделирование в отсутствие не только сетей НИР, НИОКР и ОКР, то есть различных сочетаний научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, но и промышленных высоконадёжных (робастных) и высокопроизводительных программных продуктов.

С целью представить масштабы и содержание стоящей проблемы, посмотрим на неё с различных точек зрения, или в разных системах координат. С одной стороны, вопросы моделирования можно классифицировать по отраслям, которые определяют главные направления потоков человеческих и финансовых ресурсов: машиностроение и энергетика, природопользование и химическая промышленность, биология и медицина, строительство и транспорт, сельское хозяйство и т.д. Одновременно все решаемые при этом задачи могут быть разделены в соответствии со своей математической постановкой. Системы уравнений Максвелла (электромагнетизм), Навье–Стокса (газодинамика) и Ламе (упругопластичность), уравнения тепло-массопереноса и многофазной фильтрации, системы квантовой механики и кинетической теории Больцмана – все эти формализмы отличаются богатой внутренней систематизацией и одновременно наличием разнообразных формулировок в виде дифференциальных, интегральных и/или вариационных соотношений. Наиболее практически значимыми и в то же время наиболее сложными оказываются междисциплинарные задачи, описывающие взаимодействия процессов или явлений различной природы и представляемые совокупностью различных функциональных уравнений.

Все математические задачи также делятся на прямые и обратные. К первым относятся сравнительно “простые”: все исходные данные известны и по ним требуется найти искомое решение. В постановке обратных задач, напротив, содержатся неизвестные параметры, которые необходимо определить по дополнительным условиям, включающим минимизацию заданного целевого функционала и удовлетворение каким-то ограничениям на свойства данных. Решение обратной задачи основывается на многократных расчётах прямых задач при направленном переборе параметров с помощью обширной теории методов оптимизации. Именно обратные задачи, в частности в рамках автоматизации проектирования каких-то устройств, оптимизации режима эксплуатации оборудования, а также многочисленных постановок с идентификацией параметров модели (сюда относятся задачи геологоразведки или распознавания образов), представляют

наибольшую ценность для инженера и любого производственника.

Многообразие математических задач обеспечивается очень большим числом вычислительных методов, мировой поток публикаций по этой тематике огромен, поэтому не будем останавливаться даже на простом перечислении основных направлений. Нельзя, однако, не заострить внимание на таких важных понятиях, как “плохой”, “хороший” и “наилучший” алгоритм. Введём следующее определение: метод называется оптимальным для решения заданного класса задач с требуемой точностью на указанной вычислительной системе, если он позволяет получить результат при минимальных ресурсных затратах. Таким образом, даже для фиксированного набора алгоритмов наилучшими могут оказаться разные – в зависимости от типа задачи, гарантированной погрешности результатов и применяемого компьютера. Отсюда следует, что лучшее – враг хорошего: попытка оптимизировать метод в конкретном случае, как правило, будет дороже решения задачи каким-то из существующих приемлемых способов. Особое значение приобретает высокий профессионализм – непереносимое условие грамотного проведения вычислительного эксперимента. Например, необходимым этапом вычислительного эксперимента является верификация алгоритма, доказывающая, что с его помощью поставленная задача действительно будет надёжно решена. В противном случае демонстрируемые красивые результаты могут оказаться лишь компьютерными артефактами, не имеющими отношения к реальности.

Ещё один важнейший вопрос – вычислительно-информационные технологии решения на суперЭВМ больших задач (в том числе междисциплинарных и обратных). Прежде всего это огромные объёмы прикладного программного обеспечения, которое можно разработать только при международной кооперации значительного количества групп разработчиков. Очень важно реализовать возможность переиспользования имеющихся программных продуктов, концентрирующих накопленный за многие годы колоссальный интеллектуальный потенциал. Очевидным условием создания инструментов математического моделирования выступает также высокая производительность исполнения на современных многопроцессорных вычислительных системах (МВС) со сложной архитектурой разнородных процессорных устройств, работающих на распределённой и общей иерархической памяти. По счастливому стечению обстоятельств в океане задач и алгоритмов моделирования существует чёткое разделение технологических стадий (геометрическое и функциональное моделирование, дискретизация и аппроксимация исходной задачи и т.д.), которые могут разрабатываться

достаточно автономно на принципах согласования промежуточных, или интерфейсных, структур данных.

К настоящему времени на мировом рынке имеется большое количество коммерческих и общедоступных пакетов прикладных программ (ППП) для решения определённых классов задач математического моделирования. Однако стратегическая концепция нового поколения компьютерного инструментария заключается в создании интегрированного вычислительно-информационного окружения с длительным жизненным циклом, участием широкого круга разработчиков при тесном взаимодействии учёных с инженерами. Формирование получаемой базовой системы моделирования (БСМ) должно удовлетворять следующим научно-производственным принципам:

- гибкое расширение состава вычислительных модулей с автоматизацией построения новых математических моделей и алгоритмов (данное условие является естественным в силу непрерывного развития вычислительных методов и технологий);
- адаптация к эволюции компьютерных платформ с высокопроизводительным отображением алгоритмов на архитектуру МВС;
- эффективная эксплуатация в рамках технологий облачных вычислений на вычислительных центрах коллективного пользования с удалённым доступом через Интернет.

Конечная цель рассматриваемой БСМ — переход от кустарного производства отдельных ППП к индустриальному созданию прикладного математического и программного обеспечения на основе системного подхода и общей инструментальной базы, позволяющих в разы поднять производительность разработки и применения конечных продуктов.

**Камо грядёши?** Ответ на вопрос, какая цель оправдывает средства, необходимые для осуществления рассматриваемого мегапроекта, очевиден: это массовая востребованность моделирования практически во всех сферах человеческой деятельности. Однако вопросы тактики и стратегии управления социально-экономическими процессами, которые неизбежно возникнут в предстоящую эпоху постиндустриализации, ещё ждут глубокого осознания, в том числе философского.

Так что же нас ожидает? Начнём рассмотрение с верхнего уровня — с образа учёного-энциклопедиста. Такому образу соответствовали физики-теоретики Л.Д. Ландау и Р. Фейнман, по учебникам которых в конце XX в. учился весь мир. За прошедшие десятилетия научные дисциплины настолько усложнились и специализировались, что один человек уже не в состоянии овладеть всем необходимым объёмом знаний. Палочкой-выручалочкой

в этой ситуации оказывается суперкомпьютер: он не только может дать любую справочную информацию, но и практически мгновенно решить задачу (с наглядным представлением), на которую, используя “старые технологии” кропотливых аналитических исследований, пришлось бы потратить долгие часы и дни. Следовательно, у учёного “новой формации” — как теоретика, так и экспериментатора — появляется могучий интеллектуальный помощник, но окончательное слово, подчеркнём, остаётся за человеком.

Здесь уместно провести аналогию с компьютерными шахматами. В 1974 г. в Стокгольме состоялся первый в мире чемпионат мира среди шахматных программ, который выиграла российская программа КАИССА. Тогда даже заключались нешуточные пари, сможет ли машина когда-нибудь сравниться с шахматными мастерами. Сейчас лучшие программы уже обыгрывают чемпионов мира, а профессиональные игроки не мыслят подготовку к турнирам без компьютера. Но во время соревнований его использование категорически запрещено. В этой ситуации гроссмейстер Г.К. Каспаров предложил альтернативный спорт — “живые шахматы”, в которых соревнуются пары “человек + компьютер” (эта идея пока не нашла отклика спортивной общественности).

Проблема супервычислений имеет и такой аспект, как энергозатраты. Один из главных факторов, сдерживающих появление “эксафлопсника”, — высокое электропотребление, по пессимистическим оценкам, достигающее до 100 МВт, то есть функционирование столь мощного компьютера требует работы небольшой электростанции. Задача, над которой бьются лучшие инженеры, состоит в уменьшении этой цифры до 20 МВт. Таким образом, математическое моделирование — достаточно дорогое удовольствие. Любопытно, что один из возможных выходов из данного тупика — математический, и заключается он в построении “дешёвых” алгоритмов. Работа ЭВМ состоит из выполнения арифметических операций и передачи данных. Коммуникации не только замедляют процесс, но и являются наиболее энергоёмкой его составляющей. Отсюда задача — создание алгоритмов, предполагающих наименьшие объёмы информационных обменов.

На тему “математика должна быть экономной” можно говорить много и разнообразно. Например, с какой точностью в ЭВМ надо реализовывать сами арифметические операции, чтобы гарантировать правильность численного результата, но не совершать при этом лишней работы? В стандартных архитектурах расчёты проводятся с так называемой простой и двойной точностью, когда под машинное слово отводятся 32 и 64 бита (двоичный

разряд) соответственно. Понятно, что такое решение является палиативным, в идеале надо вводить арифметику с переменной разрядностью, которая будет автоматически настраиваться на требования задачи. Подобная интеллектуальность “компьютерного железа” не совсем уж фантастическая, давно идут работы, направленные на создание ПЛИС – программируемых логических интегральных схем. На этом поприще даже может стать возможным осуществление голубой мечты математика – появление “заказного” компьютера под задачу или под алгоритм. Камнем преткновения здесь выступают опять же прозаические финансы и коммерческая конкуренция компьютерных платформ. Если эти вопросы будут решены, мы сможем увидеть, как компьютеры начнут создавать себе подобных – реально проектировать новые вычислительные устройства, что даст повод к новым философским размышлениям.

С потенциальным массовым пользователем моделирующих компьютерных систем ситуация в некотором смысле оказывается понятнее, чем с их разработчиком. Однако она имеет далеко идущие социальные последствия. Легче всего рассмотреть производства, связанные с системами автоматизации проектирования (САПР). Такие системы реализуются в разнообразных продуктах, имеющих широко известные англоязычные аббревиатуры CAD, CAE, CAM, PLM [22] и обеспечивающих продвинутые технологии компьютерного, или цифрового, инжиниринга. Уже длительное время в этой области происходит конвергенция САПРовских продуктов с программными моделирующими системами и образуется единый производственный цикл: конструкторская документация на изделие (самолёт, автомобиль и др.) подаётся в ЭВМ, где проводятся необходимые расчёты с оптимизацией, а результаты выдаются опять же в заводских форматах и непосредственно идут, например, на станки с числовым программным управлением. При этом могут быть сокращены дорогостоящие и длительные натурные испытания на аэродинамику, на прочность и разрушение, что даёт в итоге значительный экономический эффект. В подобных условиях, очевидно, возникают качественно новые требования к подготовке практически всего инженерно-технического персонала, реальной становится перспектива появления новых массовых профессий.

То же самое можно сказать и о других высокотехнологичных отраслях, вовлечённых в ключевые сферы: разработка наноматериалов, биотехнологий, новых методов геологоразведки и добычи полезных ископаемых, сберегающая энергетика и т.д. Речь идёт не только о “модных” новациях, с которыми ассоциируется современный научно-технологический прогресс, но и о традиционных областях вроде

сельского хозяйства, которые не смогут остаться в стороне от смены производственных отношений.

Происходящие технологические потрясения требуют гуманитарного осознания, и в работах философов и мыслителей-футурологов (например, Т. Куна [23] и Р. Курцвейла [24]) такие процессы связываются с категориями “научная революция”, “эволюция разума”, “постнаука”. В техническом плане описанный выше путь может быть пройден за короткие исторические сроки, и главная проблема, которая здесь возникает, состоит в массовой подготовке новых кадров – целого поколения специалистов в супервычислениях и экстремальном математическом моделировании. Необходимы новые учебные программы и курсы в широком спектре дисциплин суперкомпьютерного образования, нужны курсы переподготовки уже сформировавшихся специалистов и преподавателей. Фактически задача заключается в преодолении одного из следствий выполнения закона Мура – складывающегося мирового кадрового дефицита. Те общества, которые приложат необходимые силы для его преодоления, выйдут на путь “светлого будущего” суперкомпьютерной цивилизации.

Работа является расширенным и обобщённым вариантом статьи автора, поддержанной на конкурсе научно-популярных материалов Российского фонда фундаментальных исследований в 2017 г., грант № 17-11-20082. Данная работа также частично поддержана грантом Российского научного фонда № 14-11-00485-П и грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-29-15122. Автор выражает искреннюю благодарность кандидату философских наук М.И. Лелековой, инициировавшей данное исследование и консультировавшей его.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рассел Б. История западной философии. М.: МИФ, 1993.
2. Стёпин В.С., Горохов В.В., Розов М.А. Философия науки и техники. М.: Контакт-Альфа, 1995.
3. Основы философии науки / Под ред. С.А. Лебедева. М.: Академический проект, 2005.
4. Канке В.А. Философия математики, физики, химии, биологии. М.: КНОРК, 2011.
5. Рюэль Д. Мозг математика. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012.
6. Яновская С.А. Логика и философия математики. М.: ЛЕНАНД, 2016.
7. Арнольд В.И. Что такое математика? М.: МЦНМО, 2004.
8. Манин Ю.Н. Математика как метафора. М.: МЦНМО, 2008.



9. *Derman E.* The Future of Modelling. <http://www.ederman.com/new/docs/risk-futureofmodeling.html> (дата обращения 13.08.2017).
10. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. М.: Физматгиз, 2002.
11. *Яненко Н.Н., Коновалов А.Н.* Современные проблемы математической физики и вычислительной математики. Новосибирск: Наука, 1982.
12. *Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И.* Имитационное моделирование. М.: Академия, 2008.
13. *Краснощёков П.С., Петров А.А.* Принципы построения моделей. М.: Изд-во МГУ, 1983.
14. *Ильин В.П.* Что такое вычислительная наука? // Вестник РАН. 2010. № 4. С. 329–336.
15. *Ильин В.П.* Computational mathematics and informatics: Global challenges and Russia's roadmap // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2015. № 1. P. 8–14; *Ильин В.П.* Вычислительная математика и информатика: мировые вызовы и российская “дорожная карта” // Вестник РАН. 2015. № 2. С. 107–114.
16. *Ильин В.П.* Fundamental issues of mathematical modeling // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2016. № 2. P. 118–126; *Ильин В.П.* Фундаментальные вопросы математического моделирования // Вестник РАН. 2016. № 1. С. 26–36.
17. *Марчук Г.И.* Наука управлять наукой. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015.
18. *Гергель В.П., Стронгин Р.Г., Городецкий С.Ю. и др.* Современные методы принятия оптимальных решений. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2002.
19. *Альтшуллер Г.С.* Найти идею. Новосибирск: Наука, 1991.
20. *Загорюлько Ю.А.* Семантическая технология разработки интеллектуальных систем, ориентированная на экспертов предметной области // Онтология проектирования. 2015. № 1. С. 30–46.
21. *Kleppe A.* Software Language Engineering: Creating Domain-Specific Language Using Metamodels. N.Y.: Addison-Wesley, 2008.
22. *Левин Д.Я., Малюх Б.Н., Ушаков Д.М.* Энциклопедия PLM. Новосибирск: Азия, 2008.
23. *Кун Т.* Структура научных революций. М.: Прогресс, 1977.
24. *Курцвейл Р.* Эволюция разума. М.: ЛитРес, 2016.