

НА ПУТИ

К «УМНОМУ МИРУ»

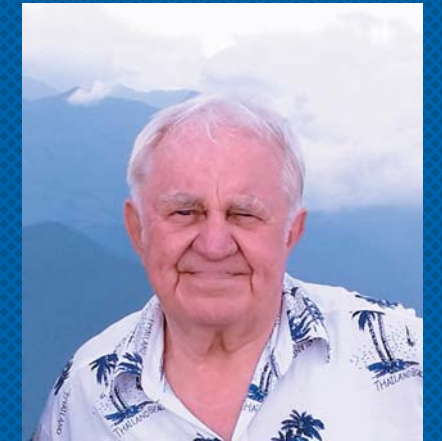
Устойчивое развитие и проблемы математического моделирования

Public Domain/alegr

Однажды великий французский математик Анри Пуанкаре обнаружил ошибку в отправленной в журнал статье, посвященной поведению сложных динамических систем. Статья к тому времени уже вышла из печати, и Пуанкаре спешно выкупил все экземпляры журнала, внес исправления и оплатил новый тираж. С такой авторской «катастрофы» началось развитие нового математического направления – теории хаоса и катастроф. Эта область теоретической математики имеет прямое отношение к пониманию эволюции реального мира и может служить яркой иллюстрацией к известному афоризму: «Нет ничего более практичного, чем хорошая теорема». Синергетика, бифуркации, притягивающие и отталкивающие множества – все эти процессы и явления, открытые теоретиками, мы наблюдаем в жизни природы и человеческого сообщества. И если взглянуть на нашу историю с точки зрения математики, то человеческую цивилизацию можно рассматривать как динамическую систему, существующую во времени и пространстве. Поведение такой системы кажется случайным, непредсказуемым и даже хаотичным, но на самом деле его можно описать математически обоснованной моделью

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительные науки, большие данные, информационные технологии, искусственный интеллект, цифровая медицина.

Key words: mathematical modeling, computer science, Big Data, information technology, artificial intelligence, digital medicine

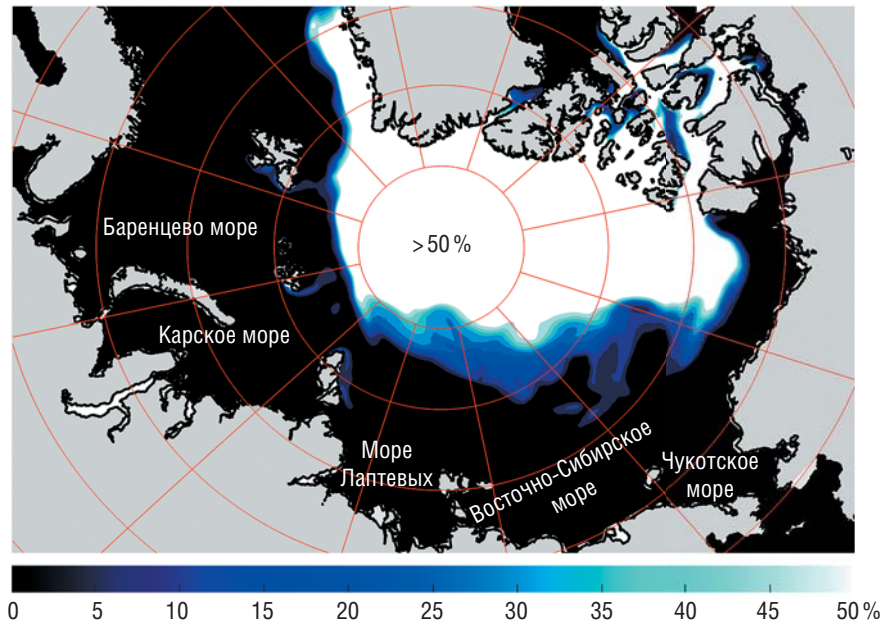


ИЛЬИН Валерий Павлович – доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории вычислительной физики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. (Новосибирск). Автор и соавтор более 400 научных статей и 14 монографий

Как пушкинский Сальери «поверил алгеброй гармонию», так и современная наука с помощью мощных суперкомпьютерных систем и математического предсказательного моделирования способна просчитывать, анализировать и прогнозировать течение сложнейших процессов, происходящих в политике, экономике, обществе.

Представьте себе: финансовые кризисы и политические перевороты, техногенные катастрофы и военные конфликты – все это в итоге можно описать с помощью дифференциальных и интегральных уравнений, построив модель на основе компьютерной обработки огромных объемов информации.

© В. П. Ильин, 2021



Концентрация морского льда в Северном Ледовитом океане, рассчитанная по модели SibCIOM для лета 2020 г. Еще полвека назад в летние месяцы практически вся площадь океана была покрыта льдами и на карте оказалась бы полностью окрашена в белый цвет. Сейчас с каждым годом льды отступают все дальше на север

А там уже остается всего один шаг до того, чтобы эти процессы оптимизировать и ими управлять, конечно, используя для этого новые машинные технологии и искусственный интеллект.

Скажете, это фантастика? Пока да. Хотя если уже существуют такие понятия, как «умный дом» и «умный город», то почему бы завтра не появиться «умному миру»?

Моделирование как новый путь познания

Первые два десятилетия XXI в. можно охарактеризовать как период интенсивного накопления новых фундаментальных и прикладных знаний. Огромные успехи были достигнуты в познании тайн как живой, так и неживой материи. Но самый большой прогресс – в области информационно-вычислительных технологий, где темпы роста начиная с середины прошлого столетия с хорошей точностью выражаются эмпирическим законом Мура (один из основателей компании *Intel*), сформулированным им еще в 1965 г.: каждые 11 лет компьютерные мощности умножаются в 1000 раз.

В 2008 г. человечество вступило в эру *петафлопсных* суперЭВМ (10^{15} флопс, т.е. арифметических операций в секунду). Следующий шаг – появление первого *эксафлопсника* (10^{18} флопс), которое кардинально изменит возможности моделирования процессов и явлений реального мира. А эффект от ожидаемого в ближайшем десятилетии *квантового компьютера*, прототипы которого уже существуют, специалисты сравнивают

с эффектом появления первой атомной бомбы. В научных публикациях уже обсуждаются перспективы будущих *зеттафлопсных* (10^{21} флопс) машин.

Вычислительные науки (*Computer Science*) активно проникают во все без исключения сферы деятельности и, наподобие кровеносной или лимфатической системы, становятся той живительной средой, где зарождаются и проверяются идеи в физике, химии, биологии и материаловедении, обретающие затем плоть в энергетике, машиностроении, медицине, сельском хозяйстве, экономике, социологии и других областях жизни.

Способность компьютера хранить и обрабатывать огромные объемы информации породила паутину интернета и виртуальные миры, а вместе с тем и не всегда очевидные коммуникационные гуманитарные проблемы. Уже появились тренды к формированию самостоятельной «постнауки» *Data Science*, претендующей на достижение прагматических результатов путем простой статистической обработки *больших данных* (*Big Data*).

Современное человечество производит невообразимое количество измерений, из анализа которых складываются наши знания об окружающей действительности. Проблема усвоения и интерпретации экспериментальных данных – это актуальнейшее направление в прогнозировании погоды, геологоразведке, ядерной физике и т.д. Причем наиболее ценные результаты получаются не из поверхностной, а из глубокой обработки данных (*Data Mining*), основанной на наукоемких моделях изучаемых объектов, процессов или явлений.

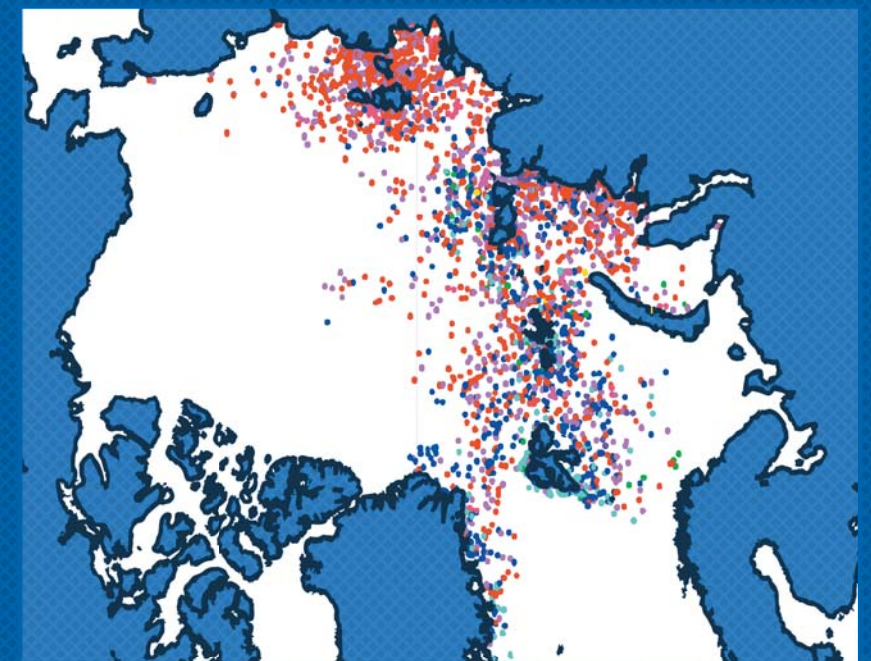
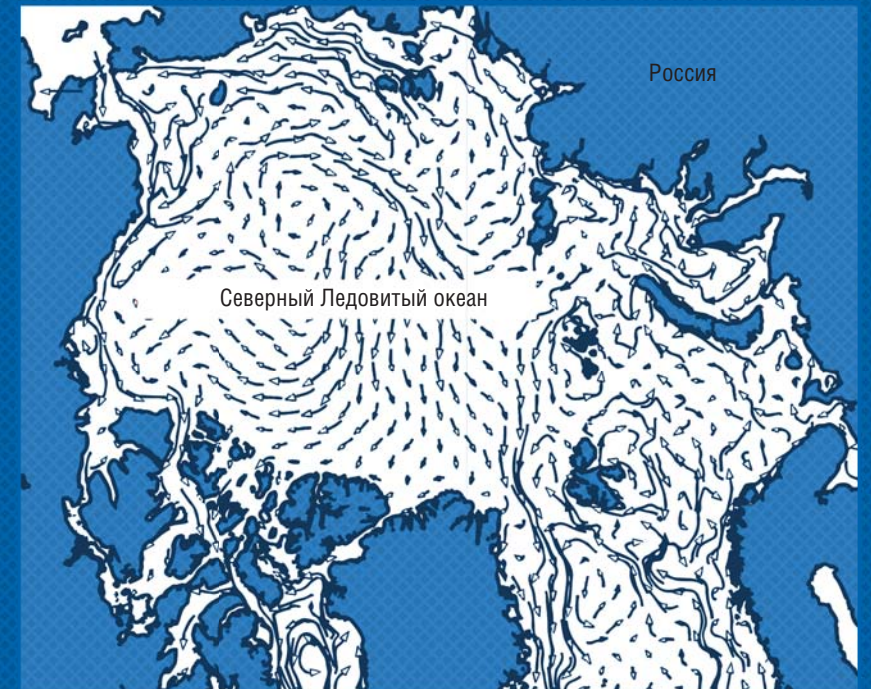
И наконец, самые продвинутые составляющие технологий познания – *искусственный интеллект*

В течение многих лет в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск) разрабатывается и совершенствуется трехмерная численная модель океана и морского льда SibCIOM (*Siberian coupled ice-ocean model*). Модель предназначена для исследования климатической изменчивости состояния вод и льдов Северного Ледовитого океана и понимания определяющих ее физических механизмов (Голубева, Платов, 2009).

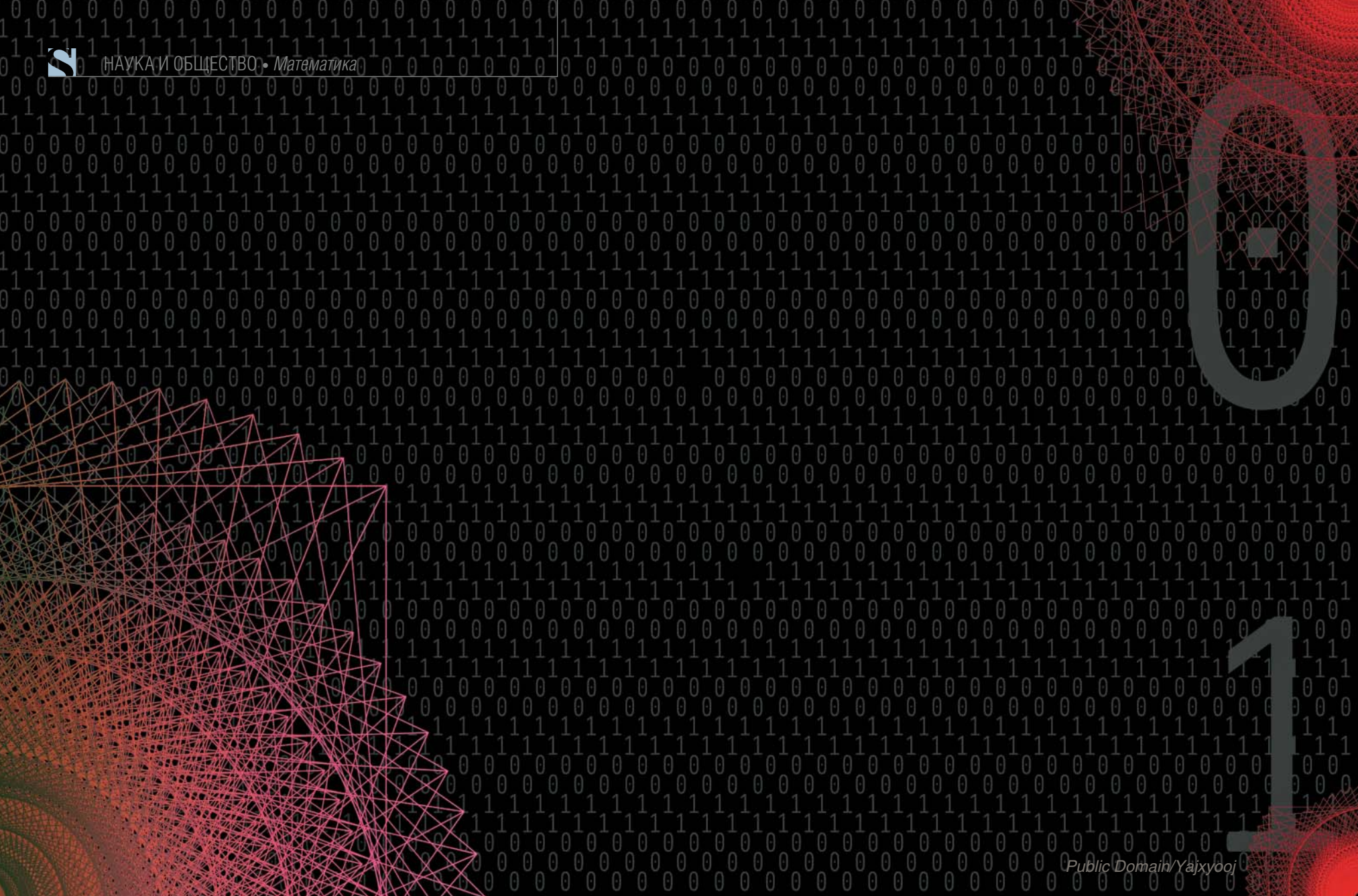
На основе этой модели рассчитываются поля течений, распределение температуры, солёности, толщины и концентрации ледового покрова. Это позволяет проследить климатические тенденции последних десятилетий: сокращение площади морского льда, рост поступления атлантических и тихоокеанских вод в Северный Ледовитый океан, повышение теплосодержания верхнего слоя океана и придонного слоя арктических морей (Голубева и др., 2015, Golubeva et al., 2020).

С помощью базовой крупномасштабной модели океана и морского льда в ИВМиМГ СО РАН были рассчитаны поля течений для построения карт циркуляции вод Северного Ледовитого океана для Национального атласа Арктики

Поле течений в поверхностном слое Северного Ледовитого океана и перенос веществ из сибирских рек по акватории Северного Ледовитого океана с распространением по глубинам. Модель позволяет не только прогнозировать изменение климата в Арктике, но и рассчитывать распространение загрязняющих веществ, которые поступают в океан вместе с водами впадающих в него рек. По результатам расчета модели SibCIOM



0–15 м: 41 % 15–30 м: 28 %
30–75 м: 22 % 75–150 м: 7 %
150–300 м: 2 % >300 м: 0,4 %



Public Domain/Yajhuoj

Примером эффективного предсказательного моделирования, которым мне с коллегами пришлось заниматься еще в конце 80-х годов, может служить машинное проектирование прибора ночного видения (или ЗОП – электронно-оптический преобразователь). «Сердце» такого ЗОПа – это система более двадцати электродов сложной конфигурации, которые преобразуют слабейший входной сигнал в четкое изображение. Рассчитать такую конструкцию – значит решить математическую обратную задачу с минимизацией функций десятков параметров и множеством противоречивых ограничений. Строго формализовать такую постановку нельзя, и мы реально осуществляли человеко-машинное взаимодействие: запускали автоматический поиск на несколько часов счета ЭВМ, а затем включали «человеческий» фактор. В таком режиме за месяц нам удалось найти параметры ЗОПа, которые после изготовления его в «железе» полностью обеспечили ему «боевые» характеристики. Надо сказать, что производство такого «изделия» в заводских условиях методом дорогих проб и ошибок могло длиться больше года без видимого успеха.

А. П. Ильин

трудоемкости, которые невозможно было себе представить еще десятилетие назад. И сама жизнь сегодня предлагает нам такую задачу. К примеру, пандемия коронавируса, ставшая в последние два года глобальным вызовом, перед которым оказались бессильны национальные правительства, здравоохранение и медицинская наука, в системном плане как раз относится к разряду тех крупномасштабных катастроф наряду с природными, техногенными и социальными, в изучении которых можно успешно применить математические подходы и методы.

Война миров: кто победит?

В начале нового тысячелетия человечество почувствовало себя на пороге величайшего научно-технологического прорыва. Вселенная готова открыть нам самые сокровенные тайны мироздания. Физики познают секреты макрокосмоса и микромира, биологи приближаются к чудесам геномной инженерии, а футурологи предрекают скорое будущее с неограниченной энергетикой, волшебными материалами, вечной молодостью и бессмертием.

На фоне такого прогресса тем более поразительной оказалась незащищенность современного общества перед нашествием коронавируса. Вспоминается научно-фантастический роман Г. Уэллса «Война миров», в котором агрессивные инопланетяне на боевых машинах громили армии землян, но не смогли противостоять микробам и бактериям, оказавшимся для них губительными.

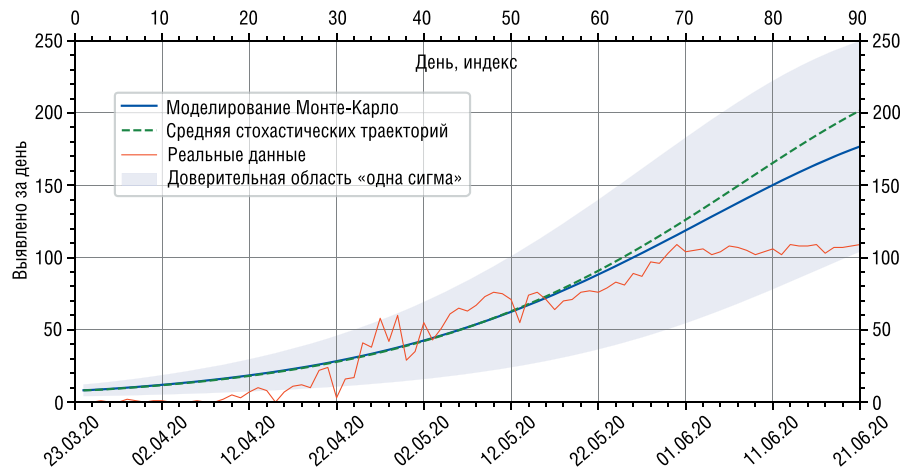
Обрушившаяся на человеческое сообщество пандемия и глобальные изменения сложившегося образа жизни уже стали центром новых дискуссий: философских, политических, исторических, экономических и гуманитарных. Мир внезапно стал иным и, может быть, уже никогда не вернется к «безмятежному» состоянию с привычными взглядами на материальные и духовные ценности. Нам потребуется время на то, чтобы принять и осмыслить эти перемены.

История человечества богата трагедиями и драмами самых разных масштабов, включая средневековые опустошительные эпидемии чумы, холеры и других страшных болезней. Из недавних примеров – «испанский грипп», поразивший множество стран в конце Первой мировой войны

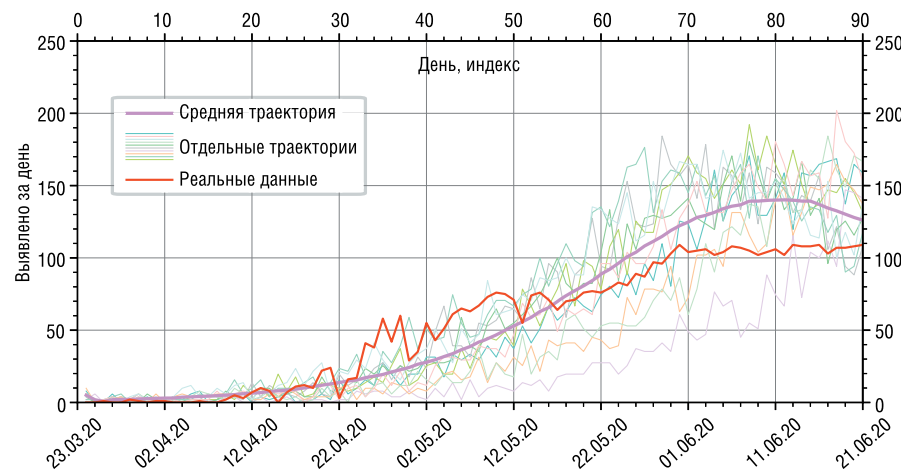
и машинное обучение. С ними связаны такие впечатляющие успехи, как распознавание образов, семантический анализ и многоязыковые переводчики текстов, игра в шахматы или го и т. д. Первые результаты в этой области (например, автоматические преобразования сложных математических формул) были получены более полувека назад. Однако современные идеи и технологии открывают здесь просто фантастические перспективы. В качестве примера можно привести создание самых разнообразных роботов. Но с фундаментальной точки зрения наиболее важным представляется производство баз знаний по различным наукам и предметным областям, а также систем принятия решений, основанных на онтологических принципах и когнитивных технологиях.

Главное назначение интеллектуальных новаций – служить ускорителем зачастую драматически длительного процесса от зарождения идеи до ее овеществления в производственных разработках. Приведенные рассуждения можно резюмировать следующей формулой: *высокопроизводительные вычисления + большие данные + искусственный интеллект = математическое моделирование*. Эта триединая структура и составляет новый путь познания. А фактически моделирование является интегрирующим фактором не только для различных наук и производств, но и для всех областей человеческой деятельности. Современные компьютерные мощности, вычислительные методы и информационные технологии позволяют решать задачи такого масштаба и такой

Высокопроизводительные вычисления + большие данные + искусственный интеллект = МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Число выявленных больных COVID-19 в сутки в Новосибирске. Средняя стохастических (случайных) траекторий и кривая дифференциальной модели оказались очень близки, но реального развития событий ни та, ни другая не отражают. При этом реальная траектория эпидемии укладывается в доверительную область, полученную в результате вероятностного моделирования



Выборочные графики для модели с инкубационным периодом коронавируса. При введении в вычисления данных об инкубационном периоде прогноз развития эпидемии становится более точным

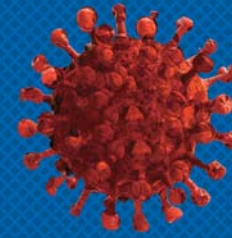
в 1918–1919 гг. Общее количество заболевших тогда исчислялось сотнями, а умерших – десятками миллионов.

Если сто лет назад «испанка» оставалась внутренним делом каждой страны, то нынешняя пандемия привела к закрытию границ и, как следствие, к гигантским социальным и финансовым потрясениям с непредсказуемыми последствиями. Одна из насущных проблем – неопределенность в поведении нового коронавируса в ближайшем и отдаленном будущем. Большинство принятых мер чисто оборонительные и недостаточны для того, чтобы справиться с угрозой. Конечно, специалисты всего мира занимаются изучением вируса для создания эффективных лекарственных препаратов. В этой области уже достигнуты серьезные успехи, включая разработку профилактических вакцин. Но несмотря на все исторические уроки, Всемирная организация здравоохранения и медицинские науки в целом не смогли не только предсказать вспышку нового опасного вируса, но и оценить масштабы возможных рисков.

Если же перейти от вопроса «кто виноват?» к формулировке «что делать?», то здесь открывается необъятное поле для организационных мероприятий и работы ученых. В первую очередь это биологические и медицинские исследования в самых разных направлениях, которые должны стать локомотивом для всех остальных научных дисциплин: физики, химии, материаловедения, нанотехнологий и т. д.

Однако надо смотреть в будущее и понимать, что сегодняшние истории болезней, биологические пробы и статистические данные – все это бесценный экспериментальный материал. На его основе должны формироваться базы знаний и коллекций опасных микроорганизмов, необходимые для развития фундаментальной вирусологии и эпидемиологии.

Конечная цель – предотвращение аналогичной биологической катастрофы в будущем. И неперемное условие здесь – активное сотрудничество заинтересованных стран, которые должны создать надежную систему коллективной безопасности, аналогичную современной



С начала пандемии COVID-19 было предложено множество численных моделей для расчета и прогнозирования распространения этого заболевания. В основе многих из них – широко используемая математическая SEIR-модель на базе системы дифференциальных уравнений, которая считается классической для описания эпидемий. Группа ученых из ИВМиМГ СО РАН под руководством чл.-корр. РАН Г. А. Михайлова и проф. РАН М. А. Марченко разработала для описания эпидемии собственную модель, основанную на стохастических (вероятностных) методах, и с ее помощью доказала, что в случае с коронавирусом дифференциальные модели не могут дать достаточно точного долгосрочного прогноза.

Как выяснилось в результате исследований, усредненная кривая развития эпидемии, которую дает дифференциальная модель, потенциально имеет большое расхождение с реальным развитием событий и с течением времени это расхождение может становиться все больше, так что спустя неделю прогнозные и реальные значения могут отличаться уже в два раза. Поскольку распространение инфекции имеет случайный (стохастический) характер, просчитать его таким образом практически невозможно: слишком много факторов влияет на рост или падение заболеваемости.

Используя стохастический метод, ученые из ИВМиМГ просчитали более 150 тыс. сценариев распространения коронавируса и получили более 150 тыс. кривых, каждая из которых представляет собой один из вероятных вариантов хода эпидемии. Таким образом была получена доверительная область, границы которой определяют условно самый оптимистичный и самый пессимистичный сценарии, а между ними – «поле» для возможного развития событий. Вводя разные параметры, учитывая те или иные факторы, можно сужать это «поле» и делать прогноз более точным. Модель была разработана для Новосибирска, но может быть использована и для других регионов.

По словам профессора Марченко, эта модель «в определенной мере имитирует реальные процессы», а значит, наиболее адекватно описывает поведение эпидемии. По сравнению с многими другими имеющимися моделями она и более гибкая: так, с ее помощью можно просчитать, как повлияют на распространение эпидемии различные инкубационные периоды у разных штаммов вируса. Для этого нужно просто изменить в вычислениях значения соответствующих коэффициентов

международной службе предупреждения цунами. Необходимы стратегические запасы фармакологических средств и медико-санитарного оборудования – точно так же, как сохраняются в мирное время склады оборонительного и сдерживающего вооружения.

Управление всей этой сложной, разноплановой деятельностью – задача для математического моделирования. Уникальный масштаб этой работы предполагает создание интеллектуального вычислительного окружения, или экосистемы, представляющей собой открытое интегрированное программное обеспечение нового поколения. Другими словами, за всем этим колоссальным «антипандемийным» проектом, за всеми мерами и мероприятиями должна стоять математика в самом широком смысле этого слова: теоретическая, прикладная и вычислительная, программирование и информационные технологии, искусственный интеллект, высокопроизводительные расчеты на суперкомпьютерах.

Здесь уместно вспомнить, что зарождение и бурное развитие ЭВМ началось не само по себе, а было инициировано в 1950-е гг. жизненно важными задачами: разработкой национальных атомных проектов и созданием «ракетного щита». Сейчас перед нами стоит новая угроза, и первоочередная задача текущего момента – это спасение людей, сокращение и уничтожение эпидемических очагов, возвращение к нормальной жизни.

Интерпол для вируса

Представьте себе гипотетическую «цифровую пандемию» – виртуального двойника настоящей, на которой можно было бы моделировать сотни и тысячи возможных сценариев, а с их помощью – изучать и понимать происходящие процессы, осуществлять предсказательное моделирование и даже управление использованием цифровой интерпретации всевозможных вирусологических технологий.

При всей грандиозности такой задачи она не представляется невыполнимой для современных суперкомпьютеров. Даже с учетом 8 млрд земель и регистрации 1 тыс. числовых характеристик на каждого человека объем информации для хранения является вполне допустимым. Передовые страны уже переходят к цифровой медицине, когда результаты каждого измерения температуры, давления, ЭКГ и других медицинских анализов пациента автоматически заносятся в его электронную карту. Все это кардинально меняет профилактическую и лечебную практику, которая может развиваться с использованием искусственного «врачебного» интеллекта на основе интегрированных медицинских данных.

Такой планетарный «антипандемийный» проект возможен только при активной международной кооперации и требует обсуждения многочисленных

социальных проблем, в том числе правовых вопросов доступа к огромным объемам персональных данных. Некоторым прототипом такой организации может служить международная система Интерпол для борьбы с уголовной преступностью. Разница здесь в масштабах: если число преступников составляет доли процента от всего населения планеты, то потенциальных переносчиков инфекции гораздо больше.

Динамические процессы протекают не только во времени, но и в пространстве. К примеру, в случае с пандемией это пассажирские потоки, в первую очередь между аэропортами крупных городов и различных государств. С медицинской точки зрения эти транспортные коммуникации следовало бы полностью перекрыть, но в современных экономических и социальных условиях сделать это нереально.

В итоге проблема пассажирских (да и грузовых) потоков для математиков формулируется как достаточно простая, понятная любому выпускнику матмеха *задача оптимизации на графах* (*граф* – математическая абстракция системы из объектов с парными связями), решение которой позволяет минимизировать инфекционные контакты при ограничениях различных типов. Однако исследовать влияние ограничений означает ответить на ряд сложнейших вопросов: от экономических и социальных до касающихся национальной или коллективной безопасности. Таким образом, задача в целом оказывается междисциплинарной.

Другой важный момент проблемы пандемии – ее масштабность, поскольку распространение инфекции необходимо изучать на самых разных уровнях: континентов, государств, городов... Даже внутри отдельного населенного пункта можно рассматривать передачу вируса между различными социальными группами.

И до сих пор речь шла только об эпидемиологических проблемах, а ведь есть еще процессы распространения инфекционного агента на уровнях клетки, отдельного органа или живого организма в целом. Наконец, самые, пожалуй, сложные для анализа предсказания и предотвращения возможных последствий – психологические и поведенческие моменты, или человеческий фактор. К примеру, реально ли обеспечить выполнение каких-то дисциплинарных мер и правил, не вызывая протестных акций?

Как мы видим, перед нами комплексная, фундаментальная мегапроблема. И пытаться решить ее «по частям», разрозненным направлениям, отделяя научную составляющую от экономической, а вопросы транспорта от вопросов здравоохранения, – значит добиться в лучшем случае локального, временного успеха. Решить такую проблему – задача для математического предсказательного моделирования с использованием искусственного интеллекта и на основе обработки огромных объемов информации, аккумулирующей

результаты научных, экономических, социологических исследований.

Сейчас попытки анализа (сказать «прогноза» – слишком смело) развития пандемии ориентированы на поиск ответов на достаточно прагматические вопросы: когда закончится эта волна и начнется ли следующая, каков будет процент заболевших и умерших в разных странах, появятся ли новые разновидности вирусов? Можно все эти характеристики изобразить графиками, диаграммами и с помощью современных систем 3D-видео, описать посредством дифференциальных и интегральных уравнений, а также создать модели изучаемых процессов и таким образом математизировать любую сложную динамическую систему.

Если хорошо исследовать и обосновать постановку такой задачи и затем построить высокопроизводительные алгоритмы, то дальше можно приступать к предсказательному математическому моделированию. И суперкомпьютеры с их огромными возможностями нам, безусловно, помогут.

Устойчивое развитие: перезагрузка

Пандемия – это далеко не единственная «головная боль» человечества. Рано или поздно любой «всемирный карантин» заканчивается, и передовые страны снова включаются в технологическую гонку по образу и подобию «Формулы-1». И во время нынешней вынужденной исторической «паузы» у нас появилась возможность задуматься не только над вопросами о целях и средствах наших устремлений, но и о ценностях, которыми мы руководствуемся.

Основная проблема: можно ли построить модель устойчивого развития цивилизации? В этих обстоятельствах палочкой-выручалочкой снова оказывается математика, в широком смысле охватывающая теоретические и прикладные исследования, вычислительные методы и информационные технологии, программирование, интеллектуализацию алгоритмов и их отображение на архитектуру ЭВМ и, конечно, математическое моделирование.

Причем эти методы необходимо использовать не только в сфере экономики и технологии, но и в первую очередь для решения гуманитарных, социальных и этических вопросов межгосударственных и человеческих отношений. А это повлечет новые проблемы. В течение последних двух десятилетий компьютеры стали неотъемлемой частью нашей жизни, превратившись в незаменимых партнеров и помощников почти во всех сферах человеческой деятельности. С дальнейшим развитием технологий эти процессы будут только углубляться, и пока еще трудно прогнозировать, к чему это приведет. Сейчас многообразные аспекты

взаимоотношений человеческого разума и компьютера профессионально обсуждаются на самых разных уровнях, примером чего является Монреальская декларация об ответственном развитии искусственного интеллекта, принятая в 2017 г.

Новизна ситуации заключается в том, что глобализация сетевых и человеко-машинных контактов настоятельно требует своего системного анализа и в конечном итоге предсказательного суперкомпьютерного моделирования. Иными словами, проблемы человеческого существования в новом информационном мире должны исследоваться с помощью информационных же технологий. И если это парадокс, то только кажущийся.

На фоне происходящего технологического взрыва особенно актуальны вопросы концептуализации и систематизации новых понятий, скрывающихся за модными терминами вроде *deep learning* и «нейронные сети». К примеру, является ли цифровая экономика давно всем известной математической экономикой? Ответ здесь не очевиден, но понятен: если первый термин означает только сбор данных и формирование «виртуальных профилей» предприятий и управляющих структур, то второй – это содержательный анализ производственных или финансовых потоков с принятием мотивированных решений.

Единственный советский математик, ставший лауреатом Нобелевской премии, академик Л. В. Канторович получил награду не просто за открытие линейного программирования, а именно за практический вклад в экономику. Ее развитие – это на 99% фундаментальные проблемы математической теории управления и методов оптимизации (примененные к правильно сформулированным моделям), которые переживают в последние десятилетия вторую молодость.

В обозримом будущем можно ожидать и таких революционных открытий, как создание моделей оптимального государственного строя с различными формами собственности, распределения доходов, социальной политики, соотношения потребления и развития и т. д. За такими терминами, как «умные города» и «электронные правительства», фактически скрывается понятие просвещенной администрации на всех уровнях: от президентского до муниципального.

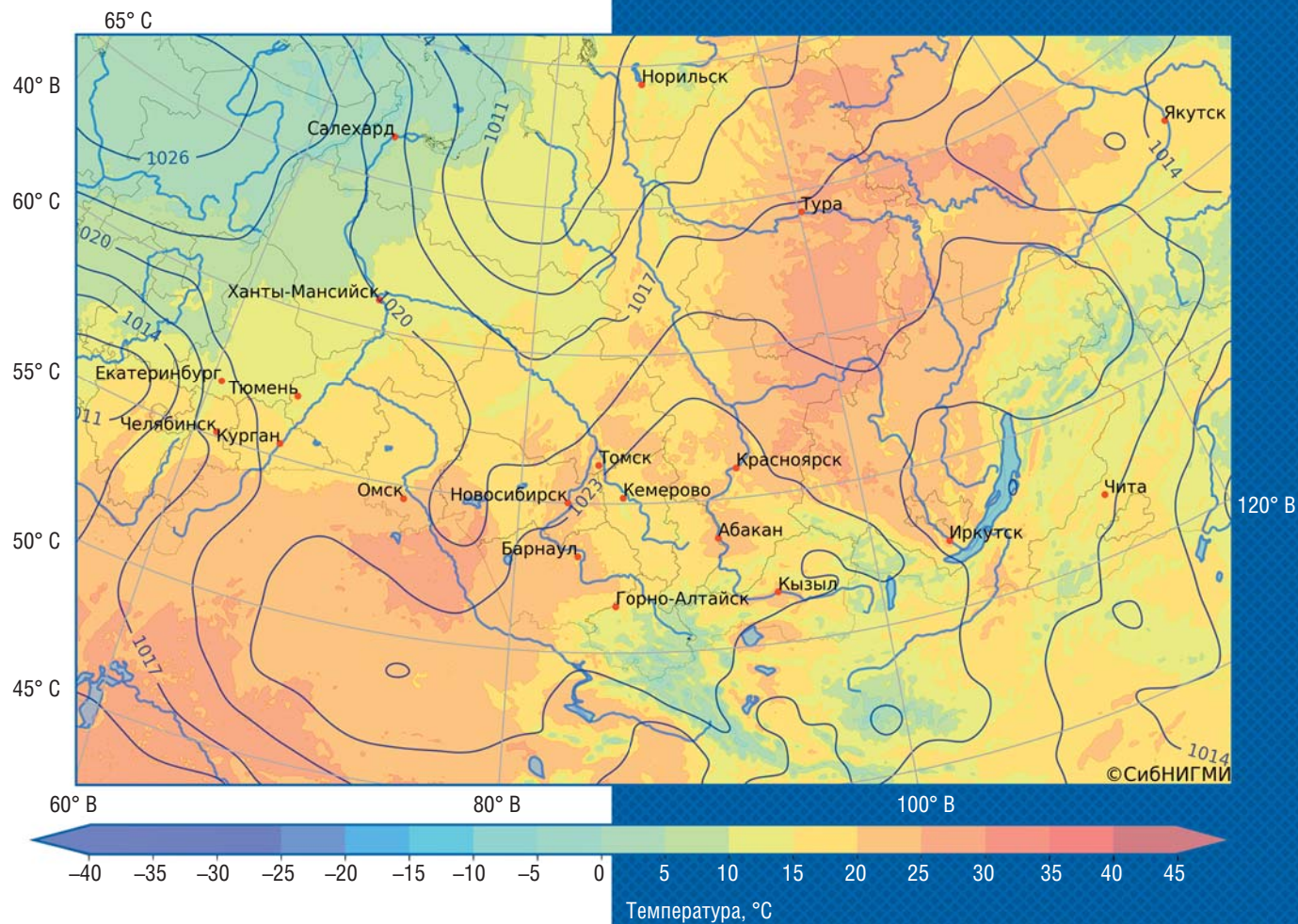
Достижение этой цели – объективно сложная научно-образовательная проблема. Компьютеризация технологии знаний требует в первую очередь построения математической модели изучаемых процессов или явлений. Это могут сделать только совместно математик и эксперт в предметной области, но для этого они должны найти общий язык и взаимопонимание, чего не предусматривает классическое высокоспециализированное образование. Такие междисциплинарные категории на стыке наук, как *вычислительная физика* или *математическая медицина*, уже давно входят в жизнь,



Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний был подписан в 1996 г. Однако с тех пор ядерные державы не перестали совершенствовать свое оружие. И испытаний новых бомб тоже не прекратили. Вот только проводить их стали уже не на реальных полигонах, а на компьютерных – с помощью методов математического моделирования.

Лидером этой компьютерной гонки вооружений оказались Соединенные Штаты. В 1980–1990-х гг. они запустили Стратегическую компьютерную инициативу для обслуживания ядерного арсенала. Первая в истории полноценная 3-мерная симуляция взрыва термоядерной бомбы была осуществлена в декабре 1999 г. Симуляция заняла 493 часа на 1000 процессорах, использовала 640 000 Мб памяти и сгенерировала 6 терабайт данных. А спустя полгода в другой лаборатории была проведена 3-мерная симуляция второй ступени взрыва.

В то время мощность компьютеров еще не позволяла с абсолютной точностью воспроизвести весь процесс испытания от начала до конца, но появление в 2005 г. нового суперкомпьютера *ASC Purple* дало возможность ученым смоделировать подрыв ядерного и термоядерного оружия в полном объеме – точно так, как это происходило бы в реальности (*Delivering Insight: The History of the Accelerated Strategic Computing Initiative*, 2009). Сейчас проведение ядерных испытаний с помощью методов математического моделирования – обычная практика. Если учесть, что каждый реальный взрыв обошелся бы в сотни миллионов долларов, то использование для этих целей виртуальных ядерных зарядов и компьютерных полигонов позволяет экономить колоссальные средства. Кроме того, виртуальные взрывы не приводят ни к разрушениям, ни к радиоактивному заражению почвы, воздуха и воды



Температура, °C

но сейчас речь идет о значительном расширении этой тенденции.

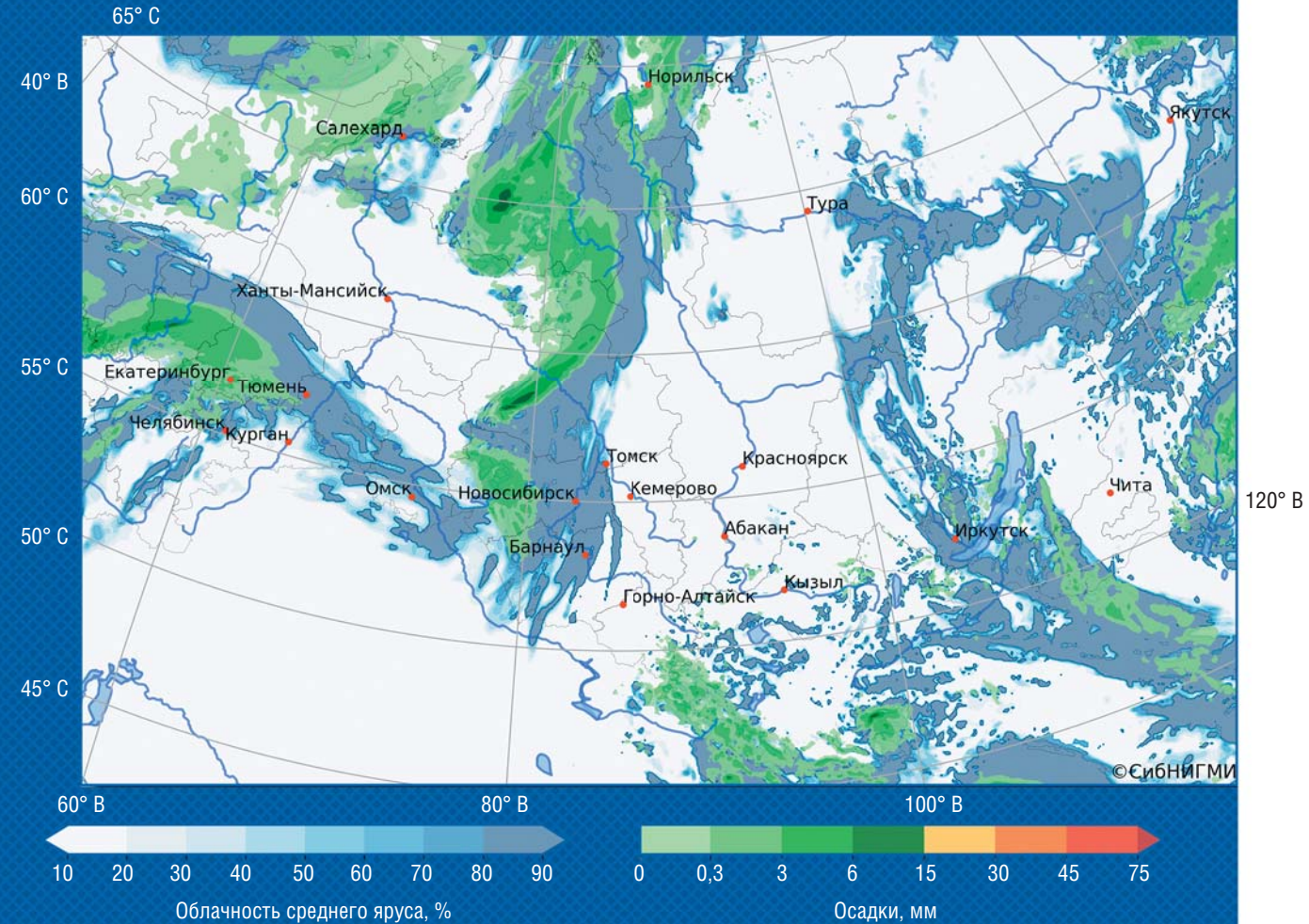
В частности, большую роль здесь должно сыграть и массовое использование обучающего программного обеспечения нового типа, основанного на дидактических принципах «глубокого машинного обучения». Без этого достижение устойчивого развития в наше время невозможно.

Успеть на уходящий поезд

Трудно себе представить, какое множество практических задач, а также их математических моделей, вычислительных методов, информационных и программных технологий существует на свете, и все они непрерывно развиваются. Поэтому естественно, что в мире накопились и постоянно растут огромные объемы прикладного программного обеспечения. Но пока темпы его развития на порядки отстают от роста суперкомпьютерных мощностей, что позволяет специалистам говорить о мировом кризисе программирования, особенно прикладного.

Прогноз температуры в Сибири от 24.05.2020. Карты краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru-Sib доступны на сайте СибНИГМИ. Они широко используются, к примеру, транспортными предприятиями. Каждый день в режиме реального времени составляются десятки и сотни карт прогноза температуры, атмосферного давления, облачности, осадков, силы и направления ветра, количества атмосферных загрязнений и др.

В связи с учащением экстремально опасных погодных явлений задача составления точного метеопрогноза с каждым годом становится все более сложной. В Сибири экстремальная погода, например, в течение летнего сезона часто связана с глубокой конвекцией (поднятие теплых околоземных масс воздуха в высокие слои атмосферы), приводящей к интенсивным осадкам и порывам ветра. Так возникают сильные грозы, ливни с градом, шквалистые ветры и смерчи. Существующим ранее моделям не удавалось должным образом описывать и прогнозировать такие процессы, поскольку они не в состоянии детально моделировать жизненный цикл конвективных облаков.



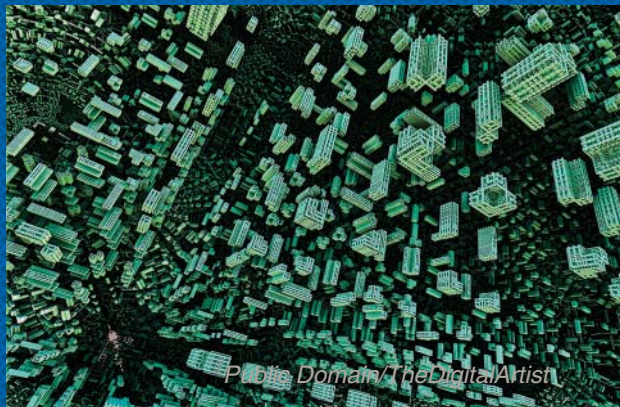
Облачность среднего яруса, %

Осадки, мм

Для составления прогнозов погоды современная метеослужба России использует методы математического моделирования. Ученые Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации (ФГБУ «Гидрометцентр России») и Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института совместно разработали суперкомпьютерную оперативную технологию численного прогноза погоды сверхвысокого разрешения COSMO-Ru-Sib для территории Сибири. Технология системы прогнозирования создана на базе европейской модели ICON-COSMO (Ривин и др., 2020). Принципиальное отличие COSMO-Ru-Sib в том, что эта модель имеет шаг сетки 2,2 или 6,6 км, в то время как у моделей-предшественников он составлял 13–20 км. Это значит, что она может учитывать и описывать погодные явления (вихри, облака) размером от 2 км, которые были недоступны прежним численным моделям с их более грубой сеткой. Значительное увеличение разрешения стало возможным за счет использования супермощного вычислителя Cray XC40-AC.

Новая технология численного прогнозирования погоды предназначена для территории Сибирского федерального округа от Омской области на западе до границы с Якутией (50°–120° в.д. и 45°–75° с.ш.). Пока еще модель COSMO-Ru-Sib не получила оперативного внедрения, но ее тестирование на одной из систем метеонаблюдений показало, что увеличение точности прогноза может составить до 20 %

Прогноз облачности и осадков в Сибири от 24.05.20. Прогнозы погоды COSMO-Ru-Sib составляются не только для уровня 2 м над поверхностью земли, как на этой карте, но и для более высоких слоев атмосферы. Без таких «высотных» прогнозов не может обойтись авиация. Всего же модель COSMO-Ru-Sib позволяет определять характеристики погоды на 40 уровнях



В основе международных договоров по климату, таких как Киотский протокол и Парижское соглашение, лежат современные компьютерные модели. И все они базируются на работах Сюкуро Манабе и Клауса Хассельмана. Именно они считаются отцами-основателями математического моделирования климата. В 2021 г. эти ученые были удостоены Нобелевской премии по физике «за физическое моделирование климата Земли, математическое описание изменчивых систем и точный прогноз глобального потепления».

Манабе был первым, кто обнаружил взаимосвязь роста температуры в нижних слоях атмосферы с содержанием углекислого газа. Свою первую математическую модель изменения климата он построил еще в 1960-х гг., и она была одномерной, поскольку компьютеры того времени не справились бы с большим объемом вычислений. Но даже упрощенная модель ясно показала: ни кислород, ни азот на потепление не влияют, но чем выше содержание в воздухе двуокиси углерода, тем быстрее повышается температура. По расчетам Манабе, удвоение концентрации CO_2 приводило к потеплению на 2 °С.

Спустя десять лет после первых результатов, полученных Манабе, его коллега Хассельман создал свою математическую модель и показал, что ключевую роль в происходящих сейчас процессах изменения климата играет человек и его хозяйственная деятельность, в частности большие объемы парниковых газов, которые выделяются при сжигании углеводородов.

Сейчас существует более 100 компьютерных моделей климата, и все они являются развитием и продолжением работ нобелевских лауреатов Манабе и Хассельмана. Как показывают эти современные расчеты, максимум потепления, который человечество может себе «позволить» в течение XXI в., – это +2 °С. Дальнейший рост средней температуры на Земле грозит нам катастрофическими сценариями

Как отмечал еще в 2008 г. крупнейший специалист по суперкомпьютерам Джек Донгарра, директор-основатель лаборатории инновационных вычислений Университета Теннесси (США), ожидаемое в скором времени появление эксафлопсников с сотнями миллионов ядер ставит перед мировым вычислительным сообществом проблему создания программного обеспечения нового поколения. Предстоящий масштаб работ будет беспрецедентным. Фактически на повестке дня стоит вопрос о создании математической базы активных знаний, которая бы объединила, систематизировала и дополнила все имеющиеся в интернете разрозненные средства.

Чтобы представить уровень задач, стоящих перед вычислительным сообществом, можно обратиться все к тому же гипотетическому проекту «цифровая пандемия», который по глубине фундаментальных проблем, объему вовлекаемой информации, многообразию возможных сценариев и критических факторов не имеет исторических прецедентов. И одолеть эту проблему можно только «всем миром» в прямом смысле этого слова, т.е. на принципах открытости и кооперации разработчиков интеллектуального программного обеспечения всех стран и мобилизации к взаимодействию самых широких слоев населения: от ученых до государственных деятелей.

Другая актуальная проблема – суперкомпьютерная грамотность в ее новом понимании, которая еще не определилась со своими формулировками и квалификационными требованиями. Очевидно, что в этом процессе первые роли должны принадлежать математическим и технологическим компетенциям. Предстоящая массовая переквалификация, подразумевающая овладение новыми информационно-вычислительными технологиями, появление новых смежных профессий и подготовку молодого поколения специалистов суперкомпьютерного будущего, ставит острые образовательные вопросы.

Актуальны будут и новые формы образования, но здесь, как говорится, нет худа без добра. Благодаря карантинным мерам в мире стал широко использоваться дистанционный формат обучения и общения, включая научные семинары, конференции и форумы. Такие технологии будут дальше, безусловно, осмысливаться и развиваться, в том числе на основе человеко-машинного взаимодействия.

Но говоря о светлом суперкомпьютерном будущем, не надо забывать, что любая медаль имеет две стороны. Не станут исключением и предстоящие технологические прорывы в индустриальных областях и социальных сферах. Уже сейчас СМИ предрекают массовую безработицу как следствие роботизации производств, предупреждают об опасностях «чипирования» населения и перехода на сплошное дистанционное

образование. В любом случае цифровизация и машинное обучение приведут к тому, что качественно изменится имидж различных специальностей и появятся новые массовые профессии.

Очевидно, что массовая информационно-технологическая грамотность в ближайшие годы станет сильнейшим катализатором развития в странах, которые овладеют соответствующими образовательными технологиями. А при наличии начального неравенства уровней технологического развития разрыв между передовыми и отстающими странами будет только усугубляться.

В связи с этим сегодня самое время задуматься о месте нашей страны в новом цифровом мире. Грядущие мировые изменения производственных отношений и социальной инфраструктуры требуют серьезных экономических вложений, посильных далеко не всем национальным сообществам. И чтобы Россия могла вместе с передовыми странами успеть на этот уходящий поезд научно-технологического прогресса, нам необходимо приложить серьезные усилия для обновления своего интеллектуального и инновационного багажа.

И здесь нельзя не отметить опасные тенденции, складывающиеся в стране последние два десятилетия. Несмотря на громкие призывы к научно-технологическим прорывам, мы заметно отстаем по таким критическим направлениям, как суперкомпьютерные мощности и особенно программное обеспечение.

Проблема не только в том, что другие страны зарабатывают миллиарды на продаже программных продуктов, тогда как мы, напротив, вынуждены тратить большие деньги на приобретение соответствующих лицензий. Иными словами, проигрываем вдвойне, и экономические потери – это еще меньшее из зол. В перспективе наше отставание чревато проблемами национальной информационной безопасности, и вот это действительно серьезная угроза.

Когда-то один из основателей династии Ротшильдов произнес знаменательную фразу: «Кто владеет информацией, тот владеет миром». С учетом новых реалий я бы выразился по-другому: в новом веке миром будет владеть тот, кто владеет информационными технологиями.

Во времена Аристотеля существовала только одна наука – философия, постигавшая тайны мироздания от космоса до законов человеческого разума. Последующие столетия привели к грандиозному расширению и углублению разделов знаний и, как следствие, к узкой специализации ученых из разных областей, с трудом понимающих друг друга.

Сегодня сохранить системный, или философский, взгляд на картину мира может только математика с ее технологиями моделирования и интеллектуальным

языком многоликого общения, который должен сыграть роль научного «эсперанто». Образно говоря, таким образом мы обретаем математизацию философии или, наоборот, философское осмысление математики и моделирования как орудия познания.

В практическом плане это дает ключ ко многим процессам, происходящим в окружающем мире и обществе. Предсказательное математическое моделирование – универсальный инструмент для решения широкого спектра задач: от технологических до управленческих, от локальных до государственных. И примером этого могла бы стать борьба с пандемией коронавируса. А конечной и высшей целью можно считать обеспечение условий для устойчивого развития всей человеческой цивилизации.

Литература

- Asch M., Moore T., Badia R. et al. *Big data and extreme-scale computing: Pathways to Convergence-Toward a shaping strategy for a future software and data ecosystem for scientific inquiry* // *Internet J. High Perform. Computing Appl.* 2018. V. 32. N. 4. P. 434–79.
- Dha V. *Data Science and Prediction* // *Commun. ACM.* 2013. V. 56. N. 12. P. 64–73.
- Dongarra J., Beckman P., Moore T. et al. *The International Exascale Software Project Roadmap* // *Internet. J. High Perform. Computing Appl.* 2011. V. 2. N. 1. P. 3–60.
- Il'in V.P. *Artificial Intelligence Problems in Mathematical Modeling* / Springer Nature Switzerland AG 2019, V. Voevodin, S. Sobolev (Eds.) // *RuSCDays. 2019. CCIS 1129. P. 505–516.*
- Il'in V.P. *How to Reorganize Computational Science and Technologies?* // *Herald Russ. Acad. Sci.* 2019. V. 89. N. 3. P. 250–258.
- Il'in V.P. *Mathematical Modeling and the Philosophy of Science* // *Herald Russ. Acad. Sci.* 2018. V. 88. N. 1. P. 81–88.
- LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. *Deep Learning* // *Nature.* 2015. V. 521. P. 436–444.
- Liao X., Lu K., Yang C. et al. *Moving from exascale to zettascale computing: challenges and techniques* // *Front. Inform. Technol. Electron. Eng.* 2018. V. 19. N. 10. P. 1236–1244.
- Lussioni A., Bengio Y. *Om the Morality of Artificial Intelligence* // *arxiv:1912.11945v1 cs.CY*. 26 Dec 2019.
- Weinan E. *Machine Learning and Computational Mathematics* // *Commun. Comput. Phys.* 2020.