

# Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде

Гордов Е.П.

*Сибирский центр климато-экологических исследований и образования*

8 января 2004 г.

After brief analysis of the place and role of computational-information technologies for Environmental Sciences a report on course of the International Young Scientist School and Conference CITES-2003 (Computational and Information Technologies for Environmental Sciences) held in Tomsk in September 2003 is given. Basic lecture courses delivered at the School as well as Invited Lectures presented at the Conference are described in brief.

Настоящий специальный выпуск журнала содержит приглашенные лекции прочитанные на Международной Школы молодых ученых «Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде» (CITES 2003), с 1 по 11 сентября в Томске, приглашенные и отобранные Программным Комитетом устные доклады, из числа представленных на проходившей в ее рамках одноименной международной конференции. Организаторами Школы и Конференции являлись: Сибирский центр климато-экологических исследований и образования (Томск), Институт оптического мониторинга СО РАН (Томск), Институт вычислительной математики РАН (Москва), Томский государственный университет и Томский университет систем управления и радиоэлектроники. В Организационный и Программный комитеты школы и конференции вошли 20 известных ученых из ведущих научных центров России, СНГ, Европы и мира. Проведение Школы было поддержано грантом 5 Рамочной Программы ЕС и Национальным комитетом Международной геосферно-биосферной программы.

Несмотря на то, что публикуемые статьи дают общее представление о тематике, уровне и масштабе мероприятия, я счел необходимым предварить этот выпуск небольшой вступительной статьей. Оснований к тому несколько. Во-первых, взгляд на современное состояние наук об окружающей среде, отраженный и в тематике Школы и Конференции и в представленных лекциях и докладах, еще не является общепринятым, во-вторых, не все из них публикуются в этом выпуске. Кроме того, по моему мнению, реализованный подход к «выращиванию» научной смены оказался успешным и, в силу актуальности вопроса о смене поколений в современной науке, его описание может оказаться полезным и применимым при организации подобных мероприятий по другим тематикам.

Хотя понятие «окружающая среда» (environment) вошедшее в последние годы в научный обиход почти совпадает с термином «географическая оболочка Земли» (атмосфера, гидросфера и деятельный слой литосферы), современные науки об окружающей среде уже не могут быть сведены к традиционной географии, с ее устоявшимися разделами и понятийным аппаратом. Действительно, в силу определения, в формирование компонент географической оболочки и в ход протекания процессов взаимодействия между ними вносят свой вклад явления, которые при рассмотрении по отдельности принадлежали бы к

физике, химии, гидро- и газодинамике, биологии, экологии и т.д. Уже из одного этого перечня следует необходимость мульти-дисциплинарных подходов в науках об окружающей среде.

Присущее любой науке стремление к пониманию явлений и прогнозированию их возникновения в науках об окружающей среде привело к осознанию недостаточности описательного уровня анализа явлений и, как следствие, к широкому использованию математического моделирования в качестве вычислительного аппарата этих наук. Развитие математических и вычислительных моделей показало явную недостаточность существующих данных о состоянии окружающей среды и стимулировало интенсивное накопление временных рядов пространственно распределенных данных инструментальных наблюдений (локальных и дистанционных). Уже эти два обстоятельства предопределили особую роль информационных технологий в этой области.

Развитие же промышленности и появление первых глобальных откликов на ее воздействие на окружающую среду перевели ряд вопросов представлявших ранее академический интерес чуть ли не в плоскость практических приложений. Ясно, что в решении вопросов оценки степени антропогенного воздействия на состояние окружающей среды, минимизации возможного ущерба от возможных изменений внешних условий и устойчивого развития в меняющихся условиях окружающей среды не обойтись ни без математического моделирования, ни без соответствующей поддержки информационными технологиями.

Можно сказать, что в настоящее время науки об окружающей среде выходят на этап перехода к точным наукам. Процесс их превращения в точные науки идет по трем быстро развивающимся направлениям:

1. Разработка новых средств инструментальных наблюдений и становление новых технологий исследований и накопления массивов данных;
2. Создание математических моделей компонент географической системы и численный прогноз их поведения;
3. Организация всей доступной информации об окружающей среде (больших массивов данных, моделей, алгоритмов и способов отображения этой информации), в первую очередь, о географической оболочке Земли, в информационные и информационно-вычислительные системы.

Именно этим вопросам и была посвящена Школа и Конференция.

Если о причинах наблюдаемых климатических изменений еще можно спорить, то антропогенная модуляция климатического сигнала является уже установленным фактом [1]. Специфика рассматриваемых процессов и их взаимосвязи предопределяют необходимость проведения мультидисциплинарных исследований и особую роль вычислительных и информационных технологий, не только являющихся инструментом выполнения научных исследований в этой области, но и, по сути, образующих ее каркас. Подтверждением тому служит уже реализуемая возможность использования проблемно и территориально ориентированных интегрированных информационно-вычислительных систем в качестве рабочего инструментария исследователей при выполнении мультидисциплинарных научных проектов об окружающей среде, в первую очередь по региональной географической оболочке. Все это вместе накладывает особые требования как к сложившимся специалистам, работающим в этой области, так и к научной смене, к ее кругозору и профессионализму.

Стратегически, Школа была нацелена на смягчение негативных последствий сложившегося в стране разрыва поколений в науке. Особенно важно не допустить этого в науках

об окружающей среде, где требования к научной смене очень высоки. Немалую роль здесь играет и тот факт, что как идущие в окружающей среде процессы, так и вмешательство в них, могут изменить жизнь многих людей. Поэтому практические приложения фундаментальной науки в этой области особенно востребованы обществом. Именно поэтому выбранный Оргкомитетом формат Школы был нацелен на то, чтобы молодые ученые не только получили новую информацию от ведущих специалистов страны и мира, работающих в этой области, но и научились применять полученные знания для решения практических задач моделирования переноса загрязнений в городской атмосфере.

Так как в последующем выпуске прочитанные на Школе курсы лекций практически не представлены, (замечу, что на сайте школы <http://scert.ru/ru/conference/cites/> можно посмотреть презентации практически всех лекций) то я остановлюсь на них более подробно. Школа молодых ученых открылась в День Знаний, 1 сентября, в конференц-зале Института оптического мониторинга СО РАН. Более 70 молодых ученых из России, Украины, Беларуси, Казахстана, Узбекистана и Грузии собрались в Томске для того, чтобы получить новые знания о последних достижениях и важнейших результатах, достигнутых в этом бурно развивающемся направлении. Вначале Школы с вводными двухчасовыми лекциями о наиболее острых современных проблемах вычислительных и информационных технологий в науках об окружающей среде выступили: Председатель Программного комитета директор Института вычислительной математики РАН (Москва) академик В.П. Дымников, главный научный сотрудник того же Института академик В.В. Воеводин и директор Института системного программирования РАН (Зеленоград) член-корр. РАН В.П. Иванников.

В своей лекции «Проблемы моделирования климата и его изменений. Математическая теория климата» В.П. Дымников рассмотрел ключевые вопросы современной теории климата: основные особенности климатической системы как физического объекта, основные гипотезы, положенные в основу формулирования современных климатических моделей, основные требования к численным схемам решения систем уравнений, лежащих в основе климатических моделей и определил, что есть математическая теория климата и каковы ее центральные задачи. Кроме того, были представлены результаты проекта международной программы СМИП по сравнению климатических моделей и их чувствительности к изменению концентрации углекислого газа и результаты выполненного на этой основе анализа по выявлению ключевых параметров и процессов, ответственных за формирование отклика климатической системы на изменение концентрации углекислого газа в атмосфере.

В прочитанной по просьбе слушателей дополнительной лекции «Чувствительность климата» В.П. Дымников ознакомил аудиторию с недавними результатами, полученными сотрудниками ИВМ в этой области. В частности, обсуждалась возможность по траектории климатической системы определить ее чувствительность к малым внешним воздействиям, т.е. задача конструирования оператора отклика климатических моделей на малые внешние воздействия и требования, каким должны удовлетворять модели, чтобы воспроизводить отклик реальной климатической системы. Кроме того, рассматривались приложения этих результатов к оценке чувствительности реальной климатической системы.

Одна из лекций В.В. Воеводина была посвящена параллельным вычислениям. В ней были даны результаты анализа существующих программных инструментальных средств, облегчающих процессы написания параллельных программ и было показано, что трудности их разработки во многом объясняются трудностями получения и исследования сведений о тонкой информационной структуре реализуемых алгоритмов. Помимо анализа си-

туации в области параллельных вычислений в лекции были намечены пути преодоления многочисленных трудностей. Материал основан на книге В.В. Воеводина и Вл.В. Воеводина [2], информация о которой имеется по адресу <http://parallel.ru>.

Вторая лекция В.В. Воеводина «Образовательные средства и Интернет» была посвящена электронному представлению учебного материала на примере созданной автором электронной энциклопедии ЛИНЕАЛ, предназначенной для получения теоретических сведений в области линейной алгебры. Она рассчитана на широкий круг пользователей от студента до научного работника и преподавателя. Включённый в систему материал содержит сведения, заведомо превышающие тот объем, что даётся в традиционных курсах. Система ЛИНЕАЛ создана в двух вариантах. Она реализована как автономная программная система для персонального компьютера и доступна в сети Интернет по адресу <http://lineal.guru.ru>. С системой также можно познакомиться в статье [3], электронный вариант которой находится по адресу <http://www.srcc.msu.su/num-meth/index.html>.

Лекция В.П. Иванникова «Модельно-ориентированный подход к разработке распределенного программного обеспечения» была посвящена обсуждению текущих результатов работ по проекту MDA (Model Driven Architecture — модельно-ориентированная архитектура). MDA — это совокупность стандартов и методологий, разрабатываемых в течение последних четырех лет международной организацией Object Management Group. Цель проекта MDA — создание универсальной метамодели, или универсального метаязыка, позволяющего описывать как существующие модели промежуточного программного обеспечения (CORBA, COM/DCOM, EJB, XML/SOAP и др.), так и модели, которые могут быть разработаны в будущем. По сути, это создание универсального метаязыка, пригодного также для описания семантики, т.е. описания исполняемых моделей.

Далее «школьникам» было прочитано два специальных лекционных курса: «Математическое моделирование климата» (главный научный сотрудник ИВМ РАН, член-корреспондент РАН В.Н. Лыкосов) и «Численное моделирование процессов переноса загрязнений на городском и региональном уровне» (профессор Томского госуниверситета А.В. Старченко). Каждый из курсов состоял из четырех 1,5 часовых лекций. Второй спецкурс сопровождался подготовленными практическими занятиями, в ходе которых «школьники» применяли освоенные вычислительные модели для анализа конкретных экологических ситуаций в г. Томске.

В курсе В.Н. Лыкосова рассчитанном на 8 академических часов (4 лекции по 1.5 часа), был рассмотрен следующий круг вопросов:

1. Физические основы моделирования климата, а именно, составляющие климатической системы, основные физические процессы, прямые и обратные связи, внутренняя и вынужденная климатическая изменчивость, глобальные и региональные изменения климата. Климат как ансамбль состояний климатической системы и модель как «лабораторный стенд» для исследования климата и его изменений.
2. Математическое описание климата, а именно, основные уравнения гидротермодинамики атмосферы и океана для описания эволюции состояния климатической системы, принципы построения конечномерных аппроксимаций для численной реализации климатических моделей, проблема параметризации процессов подсеточных масштабов. Методы параметризации отдельных физических процессов: 1) конвекция, турбулентный перенос в пограничных слоях атмосферы и океана, двумерная турбулентность, волновое сопротивление; 2) радиационный перенос, облачность, осадки;

- 3) тепловлагоперенос в деятельном слое суши и криосферы, растительном и снежном покрове.
3. Воспроизведение современного климата, в том числе, моделирование общей циркуляции атмосферы и систематические ошибки в воспроизведении параметров состояния атмосферы, моделирование и воспроизведение совместной циркуляции глобальной атмосферы и океана, роль пространственного разрешения и степени детализации описания физических процессов подсеточных масштабов и особенности моделирования регионального климата. Основные результаты реализации программы сравнения атмосферных моделей (AMIP) и предварительные итоги реализации программы сравнения совместных моделей (CMIP).
  4. Чувствительность климата, в том числе, линейный оператор отклика модели на малые внешние воздействия и локализованный и глобальный отклики атмосферной циркуляции на аномалию температуры поверхности океана в тропиках и в средних широтах. Отклик мезосферы и стратосферы на реально наблюдаемые изменения концентрации углекислого газа и озона в верхней атмосфере и оценка возможных будущих изменений климата за счет систематического роста атмосферной концентрации углекислого газа (по результатам численных экспериментов с совместными моделями в рамках программы CMIP).

В заключение курса были изложены основные направления, в рамках которых возможно развитие в ближайшие годы исследований с помощью методов математического моделирования климата.

Курс лекций А.В. Старченко был ориентирован на ознакомление слушателей с современным уровнем моделирования метеорологических процессов в масштабе города и региона, моделями переноса примеси, методами решения дифференциальных задач локальной метеорологии и переноса загрязнений, а также подходами применения многопроцессорной вычислительной техники в расчетах экологической погоды города и региона. Было прочитано четыре полуторачасовых лекции со следующей тематикой.

1. Моделирование локальных мезомасштабных процессов, где было описано текущее состояние математического моделирования метеорологических процессов над ограниченной территорией и указаны цели и задачи, на решение которых направлены мезомасштабные модели пограничного слоя атмосферы. Помимо этого, дан сравнительный анализ наиболее популярных численных моделей, используемых у нас в стране и за рубежом и приведено описание вычислительных технологий при задании начальных и граничных условий и усвоении данных метеорологических наблюдений.
2. Модели переноса примесей в атмосфере города, где был дан обзор основных загрязнителей приземного слоя воздуха, указаны метеорологические и физические факторы, оказывающие наибольшее влияние на качество воздуха в городе и представлены основные подходы моделирования переноса примесей, применяющиеся в отечественной и мировой практике для управления качеством воздуха: модели гауссова типа (модель Гиффорда-Пэскуилла, модель Берлянда), эволюционные модели лагранжевого описания переноса и дисперсии примеси, транспортные модели турбулентной диффузии. Кроме того, описаны способы моделирования газофазных химических реакций и дан краткий обзор химических схем образования вторичных загрязнителей воздуха.

3. Методы численного решения многомерных задач локальной метеорологии и переноса примеси, включая описание вычислительных технологий решения уравнений переноса, составляющих основу мезомасштабных моделей и моделей охраны окружающей среды и краткий обзор методов решения дифференциальных уравнений предваряющий подробное описание метода конечных разностей, наиболее популярного при решении задач рассматриваемого класса. Кроме того, на примере численного решения одномерного уравнения <адвекции-диффузии> были подробно разобраны основные этапы и понятия метода: выбор сетки, аппроксимация, схемная вязкость, явные и неявные схемы, решение разностной задачи, проблема устойчивости, сходимость. Указаны особенности решения многомерных уравнений переноса с использованием метода конечного объема, а также подходы численного интегрирования уравнений Навье-Стокса (Рейнольдса).
4. Использование многопроцессорной вычислительной техники с распределенной памятью при решении задач локальных атмосферных процессов и переноса примеси, где были даны стандарты передачи сообщений, неформальное введение в библиотеку функций MPI и указан порядок работы с параллельными программами в ОС UNIX. Кроме знакомства слушателей с современными технологиями параллельного программирования и общих сведений о назначении и архитектуре высокопроизводительных вычислительных систем, приводятся характеристики кластерных установок ТГУ и ИОА СО РАН, — которых участники Школы и выполняли практические задания.

Начиная со второго дня работы Школы, параллельно со слушанием курсов лекций (дополнительно к вышеуказанным, профессор Е.П. Гордов (СЦ КЛИО) и к.ф.-м.н. А.З. Фазлиев (ИОА СО РАН), прочитали две полуторачасовые лекции курса «Информационные технологии для наук об окружающей среде») ее участники начали выполнять практические задания по математическому моделированию переноса примесей в атмосфере Томска в различных метеорологических ситуациях. Практические занятия проходили в компьютерных классах одного из организаторов мероприятия - ТУСУРа. Для выполнения расчетов использовались современные высокопроизводительные вычислительные кластеры ТГУ и ИОА СО РАН. Связь классов с компьютерами осуществлялась по 100 Мб оптоволоконному каналу. По завершении семидневного образовательно-тренировочного цикла «школьники» выступили с подготовленными по результатам практических занятий докладами.

С 8 по 11 сентября началась работа Международной конференции по вычислительным и информационным технологиям для наук об окружающей среде. В Программе конференции было 4 секции: Базы данных атмосферных наблюдений, Физика климатической системы, Фундаментальные и прикладные информационно-вычислительные системы, Городская и региональная атмосфера: от моделирования к мониторингу и оценке риска. В ее работе, помимо «школьников» приняли участие более 50 специалистов страны и мира. В рамках конференции, помимо стандартного набора из приглашенных и обычных устных и стендовых докладов, ведущими в этой области специалистами были прочитаны одночасовые приглашенные лекции о самых новых и самых свежих результатах полученных ими и их коллективами. Среди приглашенных лекторов были ведущий сотрудник Института физики климата и атмосферы Д. Анфосси (Италия), директор MEDIAS-France Ж. Беньи, зав. лабораторией Института космических исследований профессор Э. Закарин (Казахстан), чл. - корр. РАН М.В. Кабанов (ИОМ СО РАН, Томск) и руководитель проекта ЕС

по изучению углеродного цикла в Сибири М. Хайманн, Институт Макса Планка по биогеохимии, Германия, а также профессора А.С. Гинзбург (Институт физики атмосферы РАН), В.А. Крутиков (ИОМ СО РАН, Томск), А.В. Кислов (Географический факультет МГУ), К.П. Куценогий (ИХКИГ СО РАН, Новосибирск) и В.В. Пененко (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск).

Далее я кратко остановлюсь лишь на некоторых из не вошедших в данный выпуск сообщениях. Выбор обусловлен тем, что, с моей точки зрения, они являются либо примерами крупных комплексных региональных проектов, либо посвящены новым перспективным подходам к решению актуальных задач. Начну с двухчасовой лекции «Determination of the Siberian carbon balance by means of «top-down» and «bottom-up» approaches», представленной М. Хайманном. В ней, после анализа общей ситуации с количественным определением роли наземной биосферы в усвоении избыточных количеств  $\text{CO}_2$ , выбрасываемых в атмосферу в результате промышленной активности, был подробно описан крупный международный проект «Terrestrial Carbon Observation System Siberia» (TCOS-Siberia, 2002–2004), финансируемый 5 Рамочной Программой ЕС. Подробное описание проекта можно найти в Интернете, по адресу [http://www.bgc.mpg.de/public/carboeur/web\\_TCOS/](http://www.bgc.mpg.de/public/carboeur/web_TCOS/). В ходе этого проекта на территории Сибири будет создана система локального инструментального определения характеристик потоков  $\text{CO}_2$  над растительностью. Данные наблюдений, будучи дополненными результатами космического зондирования, не только позволят определить баланс углерода в Сибири, но и значительно уменьшат неопределенность в оценках роли наземной биосферы в глобальном углеродном цикле. Последнее обстоятельство, несомненно, позволит увеличить достоверность оценок ожидаемого изменения климата, как глобального, так и регионального.

Следующий пример крупного регионального проекта был представлен А. Гроссом с соавторами (Baklanov A., Gross A. and Sørensen J.H. Modelling and forecasting of regional and urban microclimate and air quality, Danish Meteorological Institute). В этой лекции было описано современное состояние работ по моделированию переноса загрязнений и качества воздуха на городском и региональном уровне в Европе. В качестве примера был выбран проект ЕС FUMAREX (Integrated systems for Forecasting Urban Meteorology, Air pollution and Population EXposure). Проект нацелен на улучшение метеорологических прогнозов для городских территорий, использование численных моделей прогноза погоды в региональных и городских моделях загрязнения атмосферы и построение информационных систем, прогнозирующих качество воздуха в городе. В ходе выполнения проекта также планируется показать применимость разрабатываемых систем в городах Европы, расположенных в различных климатических условиях.

В лекции В.И. Кузина были представлены результаты анализа гидрофизических процессов инициированных высыханием Аральского моря, полученные им с соавторами (О.Ф. Васильев и В.И. Квон) в ходе выполнения проекта ИНТАСа «The rehabilitation of ecosystem and bioproductivity of part water body of the Aral Sea under condition of water scarcity» — REBASOWS. Действительно, недавние изменения уровня воды в Аральском море представляют один из наиболее драматических примеров антропогенного воздействия на окружающую среду. За последние 40 лет Арал потерял более 60% своей площади и около 80% объема, значительно возросла соленость воды и упала его биопродуктивность. Представленные результаты моделирования указывают на еще сохранившуюся возможность спасения остатков Аральского моря.

Если перечисленные выше лекции указывают на возможности инициирования новых комплексных исследовательских проектов регионального уровня, то следующие два сооб-

щения были посвящены новым перспективным подходам к решению актуальных задач. В частности, Д. Анфосси в своей лекции «Basic aspects of Lagrangian stochastic dispersion models» подробно описал популярные в моделировании переноса загрязнений Лагранжевы стохастические модели. В них перенос пассивной примеси в пограничном слое атмосферы описывается уравнением Ланжевена как движение частиц под действием случайных сил, отражающих влияние турбулентных вихрей. Т.к. вычислительный аппарат для решения этой задачи стохастической динамики был разработан и успешно применен в других областях физики, то его применение в задачах переноса загрязнений представляется весьма перспективным.

В лекции «Урбанизированные территории как энергоактивные зоны взаимодействия геосфер», представленной А.С. Гинзбургом, было предложено включить индустриальные и урбанизированные агломерации в число наиболее активных зон взаимодействия внешних геосфер Земли, предопределяющих динамику климатических изменений. Здесь были описаны основные закономерности современного этапа мировой урбанизации, даны оценки антропогенных потоков энергии на индустриальных и урбанизированных территориях, а также приведен сравнительный анализ динамики климата Москвы и Нью-Йорка в течение XX века. В современном мире, когда практически половина человечества проживает на урбанизированных территориях, которые ответственны за не менее чем две трети антропогенных выбросов тепла в окружающую среду, учет специфической роли городов в локальных, региональных и глобальных изменениях климата становится особенно актуальным.

Судя по первым откликам участников Школы и Конференции, выбранный нами формат и его реализация оказались полезными как для молодых, так и для именитых участников этого научно-образовательного мероприятия. Конечно, одна, пусть и очень успешная акция, не может решить острейшую проблему смены поколений в этом направлении науки. Для этого потребуются еще много согласованных усилий практически всех специалистов, работающих в этой области. Мне приятно отметить, что недавно созданный Сибирский центр климато-экологических исследований и образования, работающий, как Международный исследовательский центр СО РАН, уже внес свой вклад ее решение (см. <http://scert.ru/en/conferences/>) и я надеюсь, что вслед за ним последуют и другие, не менее успешные инициативы.

Несомненно, успех Школы и Конференции, в первую очередь определяется наличием достаточно подготовленных «школьников», профессионализмом лекторов, наличием «критической массы» профессионально подготовленных участников и работой Организационного и Программного комитетов. Мне приятно выразить свою благодарность всем этим группам, без вклада которых успех был бы невозможен. Не последнюю роль в формировании состава участников в наше время играет и возможность оказания им финансовой поддержки, что особенно важно для молодых ученых. Оргкомитету удалось решить эти вопросы, в частности все расходы, связанные с участием «школьников» были закрыты Оргкомитетом. Основу для этого дал грант ИНКО ЕС (ISA2-2002-60009) и вклады всех организаций — организаторов этого мероприятия, за что я их всех благодарю.

Председатель Оргкомитета,  
Директор Сибирского центра климато-экологических исследований и образования,  
Профессор Е.П. Гордов



## Список литературы

- [1] Challenges of changing Earth: Proceedings of the Global change Open Science Conference, Amsterdam, The Netherlands, 10–13 July 2001; Ed. W. Steffen et al, Springer, 2002
- [2] В.В. ВОЕВОДИН и Вл.В. ВОЕВОДИН «Параллельные вычисления», Спб, изд-во «БХВ-Петербург», 2002, 608 с.
- [3] ВОЕВОДИН В.В., ВОЕВОДИН Вл.В. ЛИНЕАЛ: электронная энциклопедия по линейной алгебре. Новые вычислительные технологии (<http://www.srcc.msu.ru/num-meth/index.html>), т. 3, с. 1–10, 2002.