

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ РАН
ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО РАН

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ В ПРОБЛЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Учебное пособие

Под редакцией

В.П. Дымникова, В.Н. Лыкосова, Е.П. Гордова

Допущено

*Учебно-методическим объединением
по образованию в области гидрометеорологии
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям «Гидрометеорология»
и «Прикладная гидрометеорология»*

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

ГЛАВА 11. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ*

В настоящее время уровень развития как самого моделирования климата и анализа климатических изменений, так и используемых при этом информационных технологий определяет передний край исследований окружающей среды в целом. Произошло это благодаря концентрации ресурсов мирового сообщества на данном важном для всего человечества направлении. Достигнутый уровень позволяет обсудить в рамках главы не только конкретные вопросы развития и применения информационных технологий в данном направлении, но затронуть общие для всех наук об окружающей среде вопросы. То обстоятельство, что в последнее время науки об окружающей среде стремительно превращаются в «точные» науки, уже ни у кого не вызывает сомнений. Немалую роль в этом процессе сыграли и продолжают играть работы по моделированию климата и анализу климатических изменений, привнесшие в эту область аппарат математического моделирования и математического анализа получаемых при моделировании результатов.

Однако есть несколько особенностей, которые отличают эти науки от таких устоявшихся точных наук, как, например, физика или химия. Главной особенностью, наверное, является то, что в число тех многих пространственных масштабов, на которых происходят изучаемые процессы, входит и сама система Земля. Инстинкт самосохранения подсказывает нам, что не стоит стремиться к постановке «климатических» экспериментов, тем более, похоже, что индустриализация уже поставила всех нас перед фактом появления последствий такого эксперимента. Для понимания и прогнозирования соответствующих явлений остаются две возможности: математическое моделирование и неразрывно связанный с ним анализ измеренных характеристик реально происходящих процессов. Отсюда следует особая роль наблюдений (измерений) различных характеристик окружающей среды (с учетом того, что наблюдения проводятся в геопривязанной точке, их пространственной организации). Второй существенной особенностью исследуемых процессов является наличие многих временных масштабов – от времен оптических переходов до времен смены геологических эпох, и то обстоятельство, что все эти процессы происходят во времени. По сути, это означает, что нам недостаточно результатов наблюдений, выполненных в определенный момент времени, значит, нужна и их организация во времени. Только систематический анализ (мониторинг) произошедших и происходящих изменений на основе данных наблюдений может дать нам некоторую основу для понимания соответствующих процессов.

* Работа по трансформации веб-портала платформы «Климат» в тематический геопортал поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 13-05-12034-офи_м).

На первых порах переход от данных измерений в точках к необходимым как для понимания, так и для практических применений полям характеристик выполнялся с помощью различного уровня сложности интерполяций. Однако в последние десятилетия для этой цели стали использовать математические модели, запускаемые в режиме ретроспективного моделирования. Появление систем усвоения данных наблюдений позволило выполнить несколько проектов восстановления полей некоторых характеристик окружающей среды для достаточно больших временных интервалов. В частности, с различным пространственным и временным разрешением были восстановлены поля метеорологических характеристик (см. <http://teanalysis.org>). Ясно, что естественное возникновение вопросов сбора и хранения данных, обеспечения доступа к ним, превращения данных в информацию, и, конечном счете, в знания – все это область информатики, которая изучает вопросы, связанные с поиском, сбором, хранением, преобразованием и использованием информации различного происхождения. Следует добавить, что еще одной особенностью наук об окружающей среде является необходимость многодисциплинарности подходов, обусловленная уже тем фактом, что сама окружающая среда есть продукт (результат) взаимодействия многих компонентов окружающей среды. Это обстоятельство приводит к необходимости совместного анализа данных не только разных форматов и размерностей, но и различной природы.

Таковыми вопросами также занимается современная информатика, где эта тематика известна под названием «слияние данных» (data fusion). Неразрывная связь наук об окружающей среде и информатики нашла свое отражение не только в появлении отдельного раздела информатики, который получил название Earth System Science Informatics (ESSI) или Environmental Informatics (EI), но и в появлении блока соответствующих этому направлению тематических секций на крупных международных конференциях по окружающей среде. Развитие средств измерений и инструментов математического моделирования привело к росту накапливаемых данных, и, как естественный отклик на это, в науках об окружающей среде возникла необходимость не только в научных результатах информатики, но и в соответствующих информационных технологиях (ИТ), дающих конкретные методы, способы, средства и правила, используемые для сбора, выделения, обработки, анализа и интерпретации данных, а также для получения новой информации и знаний.

Таким образом, широкое использование математического моделирования в качестве вычислительного аппарата и интенсивное накопление временных рядов данных наблюдений и моделирования, приведшее к необходимости работы с огромными массивами иерархизированных по временным и пространственным масштабам данных, поставили вопрос о создании вычислительно-информационной инфраструктуры, позволяющей исследователям накапливать и обрабатывать огромные массивы данных и получать знания. Такая инфраструктура должна обеспечивать получение, обмен, обработку и представление накапливаемых данных, превращение их в информационные ресурсы (данные и

их метаданные) и, в конечном счете, в новое знание. Помимо этого, она должна обеспечивать взаимодействие в процессе выполнения исследований специалистов различных направлений, необходимое в силу междисциплинарности задач, решаемых большим числом географически распределенных коллективов. Следует добавить, что в науках об окружающей среде информационные и вычислительные технологии играют особую роль. С одной стороны, они являются инструментом выполнения научных исследований, с другой – образуют их инфраструктуру, необходимую для работы.

Ниже после краткого обзора сложившейся и ожидаемой ситуации с климатическими данными наблюдений и моделирования будут проанализированы современные способы хранения и обеспечения доступа к данным и инструменты, используемые для их анализа. Отдельно будут обсуждены те проблемы, которые возникнут в ближайшем будущем при ожидаемом росте объемов архивов климатических данных до экзабайтного уровня.

11.1. Данные наблюдений и моделирования

Возвращаясь к конкретному направлению наук об окружающей среде, которому посвящена эта работа, заметим, что состояние климатической системы характеризуется большим набором величин, в число которых входят метеорологические элементы, отражающие свойства атмосферы или атмосферных процессов и тесно связанные с ними характеристики: температура почвы и воды, испарение, высота и состояние снежного покрова, продолжительность солнечного сияния и другие параметры. Все эти величины регистрируются на наземных метеостанциях при выполнении стандартных метеорологических наблюдений и аэрологических измерений. Кроме этого, проводятся гидрологические наблюдения, наблюдения за состоянием криолитозоны, ведутся актинометрические наблюдения и наблюдения за химическим составом атмосферы, включая наблюдения за содержанием аэрозолей и долгоживущих парниковых газов: диоксида углерода, метана, закиси азота, озона. Существенную роль играют океанографические наблюдения, включающие и наблюдения за состоянием морского льда. Ведутся спутниковые наблюдения за так называемыми климатически важными характеристиками (<http://gosis.org/ios/MATRICES/ECV/ECV-matrix.htm>). Вся эта работа координируется созданной Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и другими международными организациями программой Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК). Основная задача этой программы – организация долговременной системы наблюдений за климатом, опирающейся на уже существующие системы наблюдений за атмосферой, океаном и поверхностью суши, и создание базы данных о глобальных и региональных изменениях климата за длительный период времени с целью информирования правительства о происходящих изменениях климата.

Несмотря на перечисленное выше многообразие фиксируемых климатических характеристик, в дальнейшем изложении мы ограничимся рассмотрением развития информационных технологий на примере ситуации с метеорологическими элементами. Ясно, что в формировании метеорологических элементов участвует не только атмосфера, в них косвенным образом отражено влияние и всех остальных компонент климатической системы, включая и нашу цивилизацию (население Земли). Регулярные метеорологические наблюдения ведутся уже довольно давно. Именно длинные ряды этих наблюдений составили основу первых архивов климатических данных. Заметим, что ВМО определяет климатические стандартные нормы как «усредненные значения климатологических (суть то же, что метеорологических) данных, рассчитанные для следующих последовательных периодов в 30 лет: 1 января 1901 г. – 31 декабря 1930 г., 1 января 1931 г. – 31 декабря 1960 г. и т.д.» (http://www.wmo.int/datastat/wmodata_ru.html). Следующим периодом стандартных норм является 1 января 1991 г. – 31 декабря 2020 г. Кроме того, основной объем данных климатического моделирования, возникшего в результате эволюции метеорологического моделирования, также связан с полями метеорологических характеристик. Поэтому основное количество тематических публикаций посвящено работе именно с этими данными.

Как известно, метеорологические наблюдения, в ходе которых получают данные, ведутся на метеорологических станциях, постах и обсерваториях. Всемирная метеорологическая организация рекомендует строить метеорологическую сеть таким образом, чтобы для любой точки территории страны можно было с достаточной точностью получить данные о текущих условиях погоды и климате местности. Например, для получения достаточно полной характеристики температурного режима в равнинных условиях необходимо иметь сеть станций, расположенных на расстоянии 50 км друг от друга, в горных местностях – меньше 30–40 км. В настоящее время более 9 000 метеорологических станций мира участвуют в международном обмене данными наблюдений, которые проводятся ежедневно каждые три часа в строго определенные сроки: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч по всемирному времени. Данные, снабженные подробным описанием их самих и условий их получения (метаданными), передаются в национальные гидрометеорологические службы, которые отправляют их в мировые центры данных. Оттуда все эти сведения передаются метеослужбам всех стран мира для анализа, изучения, включения в модельные расчеты, построения синоптических карт и разработки прогнозов погоды. Через некоторое время, после проверки качества данных, как сами результаты наблюдений, так и некоторые построенные на их основе климатические характеристики (например, среднесуточные температуры, их минимальные и максимальные значения и т.п.) становятся доступными и для исследователей.

Государственная наблюдательная сеть России (наземная метеорологическая сеть Росгидромета), размещенная на территории 17 104 тыс. км², насчитывает 1 627 пунктов метеорологических наблюдений, осуществляющих с 1966 г. метеорологические наблюдения в 8 синхронных сроков. В реперную климати-

ческую сеть включены, как правило, пункты с полной программой наблюдений, освещающие территорию, однородную в отношении метеорологического режима. Любая реперная станция наблюдательной сети Росгидромета может считаться климатической станцией до тех пор, пока она осуществляет 8 сроков наблюдений. Из числа пунктов реперной сети выбраны станции региональной опорной климатической сети (РОКС) и международной ГСНК. Максимальные требования по продолжительности непрерывных наблюдений относятся к температуре и осадкам, для которых документально подтвержденные ряды наблюдений должны иметь продолжительность не менее 30 лет.

Ряды наблюдений на станциях ГСНК по продолжительности наблюдений распределяются следующим образом: 100 лет и более – 44 станции; 75 и более – 79; 50 и более – 130; 30 и более – 135; менее 30 лет. Наземная реперная климатическая сеть станций, включающая и сеть станций ГСНК, имеет относительно равномерное распределение на территории России. В настоящее время наземная метеорологическая реперная сеть России включает 454 пункта наблюдений, из них 135 участвуют в международном обмене в рамках программы ГСНК. Следует добавить, что более детальный анализ рядов наблюдений, полученных на реперных станциях, показывает, что не очень густая сеть российских станций, данные от которых можно уверенно использовать для анализа климатических процессов, становится еще реже (Гордов и др., 2011; Shulgina et al., 2011).

Помимо самих данных наблюдений, существенную роль в анализе климатических процессов играют вычисляемые на их основе агрегированные величины, например отнесенные к определенному временному интервалу или территории характеристики. В частности, это могут быть среднесуточные, декадные или месячные температуры, или их максимальные и минимальные значения на этих временах, либо отнесенные с помощью процедур интерполяции к ячейкам сетки, покрывающей весь Земной шар, температуры. Последние служат основой для вычисления так называемой глобальной температуры, рост которой и привел к появлению введенного журналистами термина «глобальное потепление».

Долговременная эволюция глобальной (осредненной по всему Земному шару) температуры у поверхности является самым наглядным индикатором климатических изменений. Процедура вычисления этой характеристики включает в себя отдельное вычисление температуры у поверхности суши и океанов на основе соответствующих инструментальных наблюдений на выбранных метеостанциях, кораблях и буях и последующее определение глобальной приповерхностной температуры. В настоящее время эта характеристика регулярно вычисляется тремя группами: National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies (GISTEMP, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp>), National Oceanic and Atmospheric Administration (NCDC, <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>) и Hadley Centre of the UK Meteorological Office в сотрудничестве с Climate Research Unit of East Anglia (HadCRUT, <http://cru.uea.ac.uk/cru/info/warming>), использующими для вычисления глобальной температуры немного отличающиеся подходы. Несмотря на это, получаемые результа-

ты довольно близки и то обстоятельство, что различные приемы, используемые для вычислений, приводят к близким результатам, было вполне достаточным для получения глобальных оценок на достаточно больших временных интервалах.

Однако по мере развития климатической науки и перехода от анализа изменений глобального климата к региональному или даже локальному, значительная «шумовая» составляющая, присущая историческим инструментальным измерениям температуры, стала вносить неконтролируемую неопределенность в те климатические характеристики, на основе которых и делаются выводы о требующих принятия управленческих решений последствиях климатических изменений для конкретных территорий (здоровье населения, урожайность и другие, не менее существенные направления). Именно поэтому ВМО недавно выступило с инициативой создания доступного для пользователей набора данных измерений (данных), снабженных всеми необходимыми описаниями, условиями их получения и присущими им неопределенностями (метаданными), равно как и рекомендациями для пользователей о возможности их использования для тех или иных приложений на различных пространственных масштабах. Эта инициатива, получившая название International Surface Temperature Initiative, нацелена на локализацию наблюдений погоды, организацию их превращения в полноценный сохраняемый информационный ресурс и обеспечение публичного доступа к нему (Thorne et al., 2011). Завершая обсуждение современной ситуации с данными наблюдений, следует добавить, что работа с архивами результатов традиционных метеорологических наблюдений с точки зрения информатики не представляет особенных проблем. Объем необходимых для работы наборов данных невелик и может быть легко загружен из соответствующего хранилища (центра данных) и обработан достаточно стандартными методами на рабочем месте пользователя.

Как уже было отмечено, разреженность сети наблюдательных пунктов не позволяет простыми методами интерполяции получить поля необходимого для анализа климатических процессов пространственного разрешения (Хвостова, Семенюк, 2007; Зайцев и др., 2008). Для решения этой проблемы вначале использовались глобальные метеорологические модели, обеспеченные системами усвоения в ходе вычислений специально подготовленных достоверных многолетних рядов инструментальных наблюдений. Полученные поля метеорологических элементов (так называемые реанализы первого поколения) обеспечивали глобальное покрытие по всему Земному шару на равномерной сетке и, в определенной степени, восстанавливали метеорологическую ситуацию для выбранного временного интервала. Однако они не обладали высоким разрешением.

В частности, реанализ NCEP/NCAR первой редакции (http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data) имеет пространственное разрешение $2,5 \times 2,5^\circ$ по широте и долготе, охватывает временной диапазон с 1948 г. по настоящее время и содержит 12-часовые, среднесуточные и среднemesячные данные по более чем 20 различным метеорологическим характеристикам. Реанализ NCEP/NCAR

второй редакции (<http://rda.ucar.edu>) имеет аналогичное пространственное разрешение и содержит 6-часовые данные с 1979 г. по настоящее время по 12 метеопараметрам для 17 уровней по высоте. Реанализ ECMWF ERA-40 (<http://data-portal.ecmwf.int>) также имеет разрешение $2,5 \times 2,5^\circ$, охватывает временной диапазон с 1957 по 2002 г. и содержит 6-часовые и среднемесячные данные по 12 метеопараметрам на 23 высотных уровнях. Получаемые в ходе моделирования поля являются результатами компьютерных расчетов и они, безусловно, имеют отличия от натуральных измерений, возникающие в результате влияния физико-математического аппарата моделей и используемых вычислительных технологий на получаемые значения полей метеорологических переменных (Simmons et al., 2004). Немалую роль в имеющихся отклонениях смоделированной «погоды» от реальной играет и то обстоятельство, что в ходе вычислений усваиваются только данные наблюдений, переданные в ВМО. Типичный для реанализов первого поколения объем данных достигает половины терабайта, поэтому их появление не привело к изменению общего подхода к анализу климатических изменений – загрузка из соответствующего хранилища и обработка на рабочем месте пользователя.

Развитие метеорологических моделей, систем усвоения и вычислительных ресурсов привело к появлению реанализов второго поколения, дающих более высокое пространственное и временное разрешение. В частности, реанализ Японского метеорологического агентства JMA-CRIEPI JRA-55 (<http://jra.kishou.go.jp>) имеет пространственное разрешение $1,125 \times 1,125^\circ$, охватывает временной диапазон с 1958 г. по настоящее время и содержит 6-часовые данные по 15 метеорологическим характеристикам на 23 уровнях по высоте. Глобальный климатический реанализ NOAA-CIRES (20th Century Global Reanalysis, http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean) имеет пространственное разрешение $1 \times 1^\circ$, охватывает временной интервал с 1908 по 2011 г. и содержит 6-часовые данные по 8 параметрам на 24 высотных уровнях. Архив данных GMAO MERRA (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra>) был разработан, чтобы включить спутниковые данные Системы наблюдений Земли NASA в климатические характеристики и улучшить гидрологический цикл, представленный в более ранних версиях реанализов. Поля представлены на горизонтальной сетке размерности $0,5 \times 0,67^\circ$ на 42 вертикальных уровнях давления с различным шагом измерений по времени и охватывают диапазон с 1979 г. по настоящее время для 9 метеопараметров.

Реанализ ERA Interim (<http://data-portal.ecmwf.int>) представляет улучшенную версию ERA-40 с усовершенствованной версией атмосферной модели (IFS IFS Cy31r2) и системой усвоения (4D-Var), откорректированным анализом влажности, вариационной коррекцией отклонений для спутниковых данных и т.д. Поля метеорологических величин реанализа покрывают временной период с 1979 г. по настоящее время и имеют пространственное разрешение $0,75 \times 0,75^\circ$ с 6-часовым шагом для верхней атмосферы и 3-часовым шагом для характеристик поверхности Земли. Климатический реанализ NCEP (<http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr>) охватывает диапазон с 1979 по 2010 г. и будет продолжен далее. Для вычисле-

ния полей метеорологических величин использовалась модель высоко разрешения для связанной системы «атмосфера – океан – поверхность суши – морской лед». Пространственное разрешение достигает 38 км по горизонтали и 64 уровней по вертикали в атмосфере, 0,25° по горизонтали и 40 уровней в океане, 4 уровней в почве и 3 уровней в морском льду. Добавим, что информация обо всех современных реанализах интегрирована на сайте <http://reanalysis.org>, который нацелен на предоставление исследователям помощи в получении данных реанализов, созданных различными организациями, и работе с ними. В настоящее время в ходе выполнения проекта ERA-CLIM уже создается первый реанализ третьего поколения (European Reanalysis of Global Climate Observations). Вычисляемые поля охватывают период с 1900 г. по настоящее время, с ячейкой менее 40 км и 91 уровнем по вертикали, прогнозируемый объем архива – более петабайта.

Заметим, что хотя каждый из реанализов проходит ряд процедур проверки качества данных, подтверждающих достоверность и адекватность полученной метеорологической информации, для конкретных пространственных областей результаты различных реанализов могут значительно отличаться друг от друга. Поэтому их использование для региональных оценок должно предваряться анализом их согласованности с соответствующими данными прямых наблюдений. Последнее, в частности, относится к таким регионам, как Сибирь и Арктика, где небольшое число метеостанций, измерения с которых передаются в ВМО, нерегулярно разбросано по большой территории.

Как данные наблюдений, так и данные реанализов дают возможность проанализировать уже случившиеся климатические изменения и / или реакцию на них. Для анализа возможных в будущем климатических процессов используются результаты моделирования, выполненные с помощью климатических моделей. По сути, это те же поля метеорологических характеристик, вычисленные при выбранном сценарии развития влияющих на климатические процессы результатов деятельности человечества. До тех пор пока пространственное разрешение климатических моделей было больше нескольких градусов, получение данных и работа по анализу как самих возможных климатических изменений, так и их последствий на этой основе носила вполне традиционный характер. По инерции такой подход живет и сегодня, когда пространственное разрешение глобального климатического моделирования уже меньше одного градуса, а сами климатические модели, включая в рассмотрение все большее число взаимодействующих подсистем глобальной климатической системы, стремительно превращаются в модели системы Земля. Так, объем архива результатов проекта сравнения современных климатических моделей CMIP5 (<http://cmip-rs.cmdi.llnl.gov/cmip5>) уже близится к 2 Пб и содержит более 4,5 млн файлов данных, сгруппированных в 600 тысяч наборов.

Повышение пространственного и временного разрешения метеорологических полей ведет к значительному росту объемов получаемых архивов данных, которые уже сегодня достигают сотен терабайт, а в ближайшее время перейдут на петабайтный уровень. Это обстоятельство уже делает сомнительным исполь-

зование традиционного подхода к анализу климатической информации и требует перехода к другой, распределенной и использующей современные информационные технологии, организации работы. Ясно, что для полноценного анализа этих данных нужен совершенно другой подход к работе с ними.

11.2. Центры данных и тематические информационные системы

Осознание уникальности данных наблюдений, характеризующих состояние окружающей среды, и их важности как для мониторинга ее состояния, так и для прогноза ее развития, сразу же поставило вопрос об организации их хранения и обеспечения доступа к ним. По мере роста архивов данных моделирования та же проблема возникла и для них. В качестве ответа на нее вместе с распространением Интернета возникли так называемые центры данных. Типичный центр данных, или дата-центр, выполняет функции обработки, хранения и распространения информации, как правило, в интересах тематических пользователей: он ориентирован на решение задач пользователя путем предоставления информационных услуг. В нем проводятся предварительная обработка данных, например контроль качества, раскодирование; обеспечивается их хранение, возможность выбора необходимого пользователю набора для интересующей его пространственной области и временного интервала. На первом этапе эти центры давали доступ к описанию самих данных и обеспечивали авторизованного пользователя возможностью загрузки как выбранных файлов с данными, так и программных средств для их обработки, анализа и визуализации результатов.

По мере развития информационных и вычислительных технологий эти центры стали превращаться в тематические информационные системы. Формально информационная система определяется как взаимосвязанная совокупность информационных, технических, программных, математических, организационных, правовых, эргономических, лингвистических, технологических и других средств, а также персонала и предназначена для сбора, обработки, хранения и выдачи тематической информации, включая необходимую для принятия управленческих решений. Для пользователя это формальное определение означает то, что войдя в такую систему, он получает доступ не только к тематическим данным и их описаниям, но и к тематическим информационным ресурсам, включающим в том числе и исполняемые программы предварительной обработки и визуализации выбранного набора данных. В частности, такими функциями в настоящее время обладают практически все центры, обеспечивающие доступ к данным реанализов и данным измерений и моделирования, включая и центры данных, работающие под эгидой ВМО.

Например, Национальный центр климатических данных (NCDC NOAA) поддерживает работу информационной системы NOMADS (NOAA Operational Model Archive and Distribution System), которая позволяет использовать как традиционные способы доступа к данным (ftp и веб), так и через веб-интерфейс

пользователя системы (<http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr>). Данный интерфейс позволяет создавать, просматривать и загружать изображения карт и графики, характеризующие выбранный набор данных, загружать этот набор в свой компьютер либо выполнять некоторую обработку, используя заранее подготовленные скрипты (сценарии действий, выполняемых готовыми программными компонентами системы), исполняемые на выделенном сервере GrADS Data Server (GDS, <http://grads.iges.org/grads/gds/index.html>).

В настоящее время уже реализуется новая международная программа создания глобальной информационной системы ВМО (ИСВМО) хранения и распространения данных, продуктов и услуг. Она позволит ускорить и расширить текущий обмен данными о погоде, климате и воде и другими данными об окружающей среде. Начиная с 2012 г., ИСВМО предоставляет три основных типа обслуживания: регулярный сбор и распространение по специальным каналам данных и продукции, время поступления и обработки которых является критически важным; выявление данных, обеспечение доступа к ним и их извлечение по Интернету; своевременное предоставление данных и продукции посредством сочетания специализированных средств телесвязи и Интернета. Информационная система ВМО соединяет и объединяет информацию из национальных центров данных, тематических центров сбора данных или продукции и глобальных центров информационных систем (ГЦИС), соединенных друг с другом посредством высокоскоростной выделенной сети. Благодаря своим унифицированным порталам и всеобъемлющим каталогам метаданных, глобальные центры информационных систем будут служить отправной точкой для любого запроса в отношении данных, передаваемых по ИСВМО. Они также должны обеспечивать связь с другими информационными системами, такими как Глобальная система систем наблюдений за Землей. Несколько таких центров уже официально введены в эксплуатацию в 2012 г., остальные, включая и центр в Москве, будут запущены вскоре. Информацию о доступе к глобальным центрам ИСВМО можно найти на сайте <http://www.wmo.int/giscs>.

Завершая обсуждение сложившейся ситуации с данными об окружающей среде, следует еще раз повторить, что даже использование высокоскоростных выделенных каналов передачи данных не позволяет сохранить привычный подход обработки данных и анализа ее результатов на рабочем столе исследователя. Например, оценка показывает, что только для передачи нового европейского реанализа в NCAR по хорошим каналам, связывающим Англию и Америку, необходимо несколько месяцев. Ясно, что рост объемов данных измерений и моделирования требует радикальной смены подходов.

11.3. Тематические вычислительно-информационные системы

Хотя с формальной точки зрения взаимоотношения между информационными и вычислительно-информационными системами несколько неоднозначны, а отличия между ними не очень велики, мы будем использовать второе

определение для тех информационных систем, в которых значительная часть обработки информации заключается в выполнении вычислительных операций и / или численного моделирования, для чего используются включенные в систему вычислительные ресурсы (один или несколько компьютеров / процессоров). Описанные выше центры данных и многочисленные веб-порталы, предоставляющие доступ к климатическим информационным ресурсам (тематическим данным, программам их обработки, литературе и т.д.), согласно этому определению относятся к информационным системам.

То обстоятельство, что появление больших архивов данных создаст проблемы с анализом происходящих и возможных в будущем процессов в окружающей среде, просматривалось еще в конце прошлого века. Одним из откликов на этот вызов стало создание на основе современных вычислительно-информационных технологий тематических вычислительных систем и веб-порталов (Гордов, Фазлиев, 2004), позволяющих решать ряд климатических задач различного уровня сложности. На этом этапе казалось, что развитие интернет-технологий позволит решить задачу такой организации всей доступной информации об окружающей среде в вычислительно-информационные веб-системы, которая даст возможность выполнять анализ больших архивов разнородных данных об окружающей среде, избегая ограничений рабочего стола персонального компьютера. Основная идея этого подхода состоит в том, чтобы собрать в единую систему данные, инструменты обработки и визуализации ее результатов, вычислительные ресурсы, на которых осуществляется выбранный исследователем тип обработки, и обеспечить интернет-доступ к системе через понятный пользователю интерфейс.

Такой подход опирается на уже ставшую традиционной структуру представления любой вычислительной задачи в виде трехуровневой информационной системы: уровень данных и метаданных (информации), уровень вычислений и уровень знаний. В этом случае исследователь берет на свой компьютер только результаты выполненного анализа (знания), объем которых значительно меньше объема использованных при его выполнении данных. Конечно, реализация этого подхода предполагает сбор изначально неоднородных данных, необходимых для выполнения тематических задач анализа, приведение их к выбранным для обработки форматам, организацию их хранения и доступа к ним. Кроме того, необходимо разработать достаточно полный, удовлетворяющий ожидаемым запросам пользователя набор выполняемых вычислительных программ, создать интуитивно понятный пользователю веб-интерфейс и, конечно, связать все это в эффективно работающую систему. При этом реализация подхода должна объединять оценку достоверности используемой метеорологической информации и тщательный подбор статистических методов ее обработки.

На сегодняшний день существует несколько вычислительно-информационных систем, направленных, в той или иной мере, на обработку геофизических данных об окружающей среде. В качестве примеров можно привести модель распределенной информационно-аналитической системы

ИВТ/ИГМ СО РАН (Шокин и др., 2012) для поиска, обработки и анализа пространственно-распределенных данных, а также систему анализа метеорологических данных в режиме реального времени (Samet, Tural, 2010). Намного более функциональной системой для обработки и визуализации данных спутниковых наблюдений является система GES-DISC Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI), разработанная в NASA (<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni>; Berrick et al., 2009). Одной из наиболее развитых является система RIMS для интегрированной онлайн-обработки разнородных данных по климату, гидрологии, данных дистанционного зондирования и др. (<http://RIMS.unh.edu>). Это весьма успешная попытка реализации полнофункциональной ГИС-системы в виде веб-приложения с помощью такого картографического программного обеспечения, как MapServer (<http://mapserver.org>). Она широко используется при выполнении многочисленных исследовательских проектов (Welp et al., 2005), включая проекты NEESPI (Northern Eurasian Earth Science Partnership Initiative, <http://NEESPI.sr.unh.edu>). Ее отличием от стандартных веб-ГИС является работа именно с цифровыми наборами данных, а не с их графическими представлениями, включая такую функциональность, как доступ к значениям данных для каждого пикселя демонстрируемой карты, доступ к данным, агрегированным по пространственному и временному критериям, а также инструменты для их поиска.

Приведенные примеры показывают, что современные информационно-телекоммуникационные технологии позволяют интегрировать различные программные решения для построения требуемых интернет-ресурсов. Ясно, что ни одна из существующих систем не может в принципе решать весь спектр задач, возникающих в области климато-экологического мониторинга, и нужно создавать тематически направленные системы, удовлетворяющие необходимым требованиям к общей схеме интерактивного взаимодействия геопривязанных данных, метаданных, пользователей и вычислительных инструментов. Использование этого подхода для разработки доступных через Интернет тематических вычислительно-информационных систем, а также организация обмена данными и знаниями между ними являются перспективным способом создания распределенной коммуникационной среды (вычислительно-информационной инфраструктуры) поддержки междисциплинарных региональных и глобальных исследований в области наук о Земле (Гордов, Лыкосов, 2007). В частности, она нужна и для анализа климатических изменений и их влияния на поведение всех компонент окружающей среды, на социальную ситуацию и экономическую активность человечества. Наличие такой инфраструктуры особенно важно для интегрированных научных исследований окружающей среды регионального масштаба (Gordov, Vaganov, 2010), где большое число географически распределенных специалистов различных направлений должны работать совместно.

Следует добавить, что в начальных реализациях такого подхода почти не учитывалась геопривязанность данных наблюдений и моделирования. В то же время сейчас большинство специалистов, работающих с пространственными

данными, полагает, что тематические вычислительно-информационные системы и опирающаяся на них вычислительно-информационная инфраструктура наук об окружающей среде должны основываться на комбинированном использовании потенциала веб- и ГИС-технологий (Gupta et al., 1999; Dragicevic et al., 2000; Vatsavai et al., 2000; Peng and Tsou, 2003; Frans, van der Wel, 2005; Якубайлик, 2007). Следовательно, тематические прикладные вычислительно-информационные веб-системы, являющиеся ключевыми элементами такой инфраструктуры, должны обладать функциональностью ГИС. Действительно, только комбинирование потенциала веб- и ГИС-технологий позволяет использовать мощные вычислительные ресурсы, обеспечить распределенный доступ и обработку огромных архивов данных и сохранить наглядность анализа и его результатов, присущую традиционным ГИС. Преимущества использования веб-ГИС-технологий достаточно очевидны: теоретическая независимость от веб-браузеров и операционных систем; возможность комбинированного использования географически распределенных источников данных в случае совместимых проекций, масштабов и качества данных; возможность совместного использования централизованных хранилищ данных; автоматическая установка и обновление версий приложения.

11.4. Вычислительно-геоинформационная веб-система «Климат» для изучения региональных климатических изменений и их последствий

Работа по созданию элементов и самой вычислительно-информационной инфраструктуры для мониторинга и прогноза климатических изменений и их последствий для окружающей среды, обсуждаемой далее, началась в конце прошлого века в Институте оптики атмосферы СО РАН и затем продолжалась в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Первоначально основное внимание уделялось атмосферным процессам (Adamov et al., 1999; Gordov et al., 2000). В дальнейшем в рассмотрение были включены и другие подсистемы окружающей среды (Гордов и др., 2004; Gordov et al., 2006). Следующий этап работ в этом направлении характеризуется еще большим упором на использование веб- и ГИС-технологий (Gordov et al., 2010; Гордов и др., 2007, 2011; Окладников и др., 2008, 2013; Titov et al., 2009; Титов и др., 2009, 2010, 2012) и расширением области применения (Гордова и др., 2013).

Главным «драйвером» этой работы является проводимое по эгидой Российского национального комитета по МГБП интегрированное региональное исследование окружающей среды Сибири (ИРИС/SIRS, <http://sirs.scert.ru>). В ходе его выполнения была осознана необходимость поддержки мультидисциплинарных и географически распределенных групп исследователей, выполняющих совместные проекты по изучению Сибири, инструментом для обмена данными,

моделями и знанием, а также необходимость оптимизации использования доступных вычислительно-информационных ресурсов и приложений. Именно эти функции должна выполнять вычислительно-информационная инфраструктура SIRS. Ее ключевыми элементами являются тематические научные веб-порталы (вычислительно-информационные системы) для комплексного анализа наборов пространственно-привязанных геофизических данных с целью мониторинга и прогнозирования климатических и экосистемных изменений (метеорологические наблюдения, результаты моделирования и реанализа, данные дистанционного зондирования), обеспечивающие интерактивный доступ исследователей к данным, моделям и инструментарию. За это время было создано несколько тематических вычислительно-информационных веб-систем, работа которых поддерживается и в настоящее время. Это портал атмосферных наук ATMOS (<http://atmos.iao.ru>, <http://atmos.scert.ru>), портал анализа антропогенных рисков на территории Сибири RISKS (<http://climate.risks.scert.ru>) и портал сети по изучению изменений окружающей среды Сибири ENVIROMIS (<http://enviromis.scert.ru/en>). Описание функциональности и возможностей этих систем можно найти на соответствующих сайтах и в упомянутых выше статьях.

Созданная на основе новых подходов система для обработки и визуализации климатических и метеорологических данных «Климат» достаточно подробно описана в монографии (Гордов и др., 2013), поэтому многие технические детали подхода будут опущены. Она является комплексным веб-ГИС-приложением, реализующим необходимую для проведения климато-экологических исследований интеграцию результатов моделирования, наблюдений и функциональность ретроспективного анализа. Доступ к системе осуществляется через веб-портал <http://climate.scert.ru>, который является связующим звеном, реализующим логику веб-приложений, связь с картографическими веб-сервисами, и обеспечивающим работу с хранилищем метаданных. Она включает в себя структурированные архивы пространственно-привязанных геофизических данных, снабженные соответствующими метаданными; вычислительное ядро, представляющее собой набор независимых модулей, реализованных на языках GDL (GNU Data Language, <http://gnudatalanguage.sourceforge.net>) и Python (<http://www.python.org>), а также графический интерфейс пользователя.

Веб-портал предоставляет функциональность авторизации пользователей, подключение к базам данных, использование HTML-шаблонов, языковую локализацию, систему управления контентом и ряд других возможностей. Управляющие PHP-модули (контроллеры) веб-портала организованы в пакетную структуру и обеспечивают серверный интерфейс для взаимодействия с графическим интерфейсом пользователя, вычислительным ядром, картографическими веб-сервисами и хранилищем геоданных. Разработка веб-портала была выполнена согласно общим принципам и стандартам в области создания программного обеспечения, предоставляющего картографические веб-сервисы, разработанным международной организацией Open Geospatial Consortium (<http://www.opengeospatial.org>). При этом благодаря использованию программного обеспечения

Geoserver 2.1.0 была учтена современная тенденция переноса в веб не только простой визуализации пространственных данных, но и собственно их обработки и анализа.

Набор доступных для использования геофизических данных в настоящее время включает в себя первую и вторую редакцию реанализа NCEP – NCAR, реанализ JRA-25, реанализы ERA-40 и ERA Interim, реанализ XX века NOAA – CIRES, реанализ MERA, два реанализа осадков: APHRODITE и GPCC, а также результаты моделирования исторического климата и климатических проекций до 2100 г., полученные с помощью климатической модели Института вычислительной математики РАН (Dianskii et al., 2010). Кроме того, в архиве размещены данные, полученные с помощью модели «Planet Simulator» (Fraedrich et al., 2005), региональной модели WRF (Skamarock et al., 2008), отобранные спутниковые снимки Landsat 4-7, Global Land Survey (GLS), MODIS, а также данные наблюдений с метеостанций, расположенных на территории Российской Федерации.

Вычислительное ядро реализует базовую функциональность для работы с архивами геофизических данных (доступ, поиск, выборка, представление данных в форматах NetCDF, Shapefile и т.д.), а также вызывает вычислительные модули, реализующие процедуры анализа, обработки и визуализации данных. Функции ядра выполняются в среде GDL, а их вызов и управление производится PHP-модулями, выполняемыми в рамках специализированного веб-портала. Работа вычислительного ядра по обработке данных, передаче промежуточных результатов и записи окончательных результатов в файлы регламентируется заданием, формируемым веб-порталом на основе параметров, заданных пользователем в графическом веб-интерфейсе. Задание представляет собой XML-файл, который содержит указания на обрабатываемые геофизические характеристики, пространственные и временные границы интересующей области, базисный слой карты, выбранной для анализа территории, а также последовательность обработки каждого метеопараметра, с указанием свойств вывода результатов в графические файлы. Менеджер ядра проводит анализ задания, подготавливает расчетный конвейер и производит запуск соответствующих вычислительных модулей. Программные модули обработки и анализа работают под управлением вычислительного ядра.

Вычисляются основные статистические характеристики (среднее значение, среднеквадратическое отклонение, наибольшее и наименьшее значения метеовеличины) и показатели временной структуры метеорологических рядов (повторяемость и непрерывная продолжительность атмосферного явления со значениями метеорологических величин выше или ниже заданных пределов в пределах выбранного периода времени), отражающие закономерности изменения случайных величин во времени и в пространстве. Кроме того, на основе индексов климатических изменений (<http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/indices.shtml>) сформирован набор вычислительных модулей для получения сведений об экстремальных значениях суточной температуры и суточного количества осадков и их вероятностных характеристиках. Некоторые индексы вычисляются для фиксированных пороговых зна-

чений, связанных с конкретными применениями. В этих случаях пороговые значения принимаются одними и теми же для всей используемой сети наблюдений. Другие индексы основываются на пороговых значениях, которые меняются в зависимости от местоположения наблюдательных пунктов. В этих случаях пороговые значения определяются как процентиля соответствующих рядов данных (Sillmann, Roeskner, 2008). Особенности временной динамики климатических показателей определяются долговременными составляющими временных рядов – трендами, позволяющими оценить тенденцию изменения метеорологической величины, оценкой статистической значимости выявленных тенденций, а также степенью корреляционных связей метеорологических явлений. Такая последовательность процедур, включающая вычисление климатических показателей и изучение их пространственной и временной динамики, позволяет получить наиболее полное представление об особенностях происходящих колебаний климатической системы изучаемого региона.

В настоящее время в системе присутствуют модули, вычисляющие следующие величины: 1) среднее значение метеовеличины по времени (для любой метеорологической величины и любых пространственных и временных границ); 2) значение метеорологической величины, осредненной по территории; 3) дисперсия и стандартное отклонение для выбранной метеорологической величины и пространственно-временных границ; 4) абсолютное максимальное и минимальное значение метеовеличины в заданных временных границах; 5) минимальное значение из ряда максимальных значений и максимальное значение из ряда минимальных значений метеовеличины; 6) амплитуда колебаний в заданных временных границах; 7) годовое количество морозных (минимальная суточная температура воздуха ниже 0°C) и летних (максимальная суточная температура воздуха выше 25°C) дней; 8) количество дней с заморозками и тропических ночей (минимальная суточная температура воздуха выше 20°C); 9) продолжительность вегетационного периода (годовое количество дней между первым интервалом с по меньшей мере шестью днями со среднесуточной температурой выше 5°C и первым интервалом с начала первого июля с по меньшей мере шестью днями со среднесуточной температурой ниже $5,1^{\circ}\text{C}$); 10) сумма эффективных температур (сумма средних суточных температур воздуха или почвы, уменьшенных на величину $5,1^{\circ}\text{C}$); 11) суммарное количество и интенсивность осадков; 12) количество дней в рамках заданного временного диапазона с осадками выше заданного значения; 13) день и пятидневный период с максимальным количеством осадков в рамках заданного месяца; 14) максимальная продолжительность периода без осадков и с осадками; 15) коэффициенты линейной регрессии; 16) индекс NDVI по спутниковым данным; изображение в псевдоестественной цветовой гамме по спутниковым данным. Благодаря модульной организации, функциональные возможности разработанной веб-системы могут легко расширяться путем добавления новых модулей, созданных как разработчиками, так и пользователями системы. По окончании расчетов модуль вывода и визуализации записывает, согласно заданиям, результаты в фай-

лы форматов GeoTIFF, ESRI Shapefile, NetCDF или XML. Графические файлы передаются в GeoServer для представления пользователю в виде слоев на карте. Зарегистрированный пользователь может свободно получить результаты графического отображения как данных, так и результатов их обработки, но не имеет непосредственного доступа к данным и не может скачать их.

Веб-интерфейс также предоставляет интерфейс программирования приложений для реализации соответствующих PHP-контроллеров, связывающих вычислительное ядро, веб-портал и картографические веб-сервисы. Графический интерфейс веб-приложения при этом имеет возможность непосредственно оперировать картографическими веб-сервисами. Веб-интерфейс взаимодействует с конечным пользователем, решающим вычислительную задачу в области климато-экологического мониторинга и прогноза: обеспечивает связь с программными модулями веб-портала (авторизация, локализация и т.д.), создает формализованное описание задач для вычислительного ядра, а также предоставляет результаты вычислений в цифровом и графическом видах.

11.5. Применение веб-системы для проведения климато-экологических исследований

При проведении климато-экологических исследований с использованием вычислительно-геоинформационной веб-системы пользователь взаимодействует с интернет-сайтом, открытым в любом графическом веб-браузере, который имеется на любой современной рабочей станции. С помощью графического интерфейса веб-системы, используя ГИС-функциональность, имеется возможность манипулировать результатами обработки и анализа, представленными в виде слоев на географической карте для выбранного региона.

При первом входе в веб-систему (рис. 11.1) пользователь имеет доступ к базовым и ранее подготовленным (рис. 11.2) слоям, а также может добавить новые слои, полученные в результате обработки архивов геофизических данных или численных моделей, имеющихся в веб-платформе. При добавлении пользователем нового слоя выполняются следующие операции. Через интерфейс выбираются обрабатываемые геофизические характеристики, последовательность математической и / или статистической обработки метеорологических параметров (рис.11.3), а также пространственные (рис. 11.4) границы интересующей области и временной интервал. На основе задания пользователя веб-порталом формируется задание на обработку и визуализацию данных.

Менеджер вычислительного ядра на удаленном сервере получает и производит анализ задания, подготавливает расчетный конвейер и запускает необходимые модули ядра для поиска, извлечения и обработки данных из соответствующего архива геофизических данных. По окончании работы расчетных модулей результаты передаются в модули визуализации и записи в геопривязанные графические файлы (GeoTIFF) и файлы данных (ESRI

Sharfile, netCDF, XML). Полученные файлы возвращаются на центральный сервер и передаются в веб-портал для добавления нового слоя на карту и отображения в графическом интерфейсе пользователя (рис. 11.5). Кроме того, данные предоставляются пользователю для скачивания через веб-интерфейс.

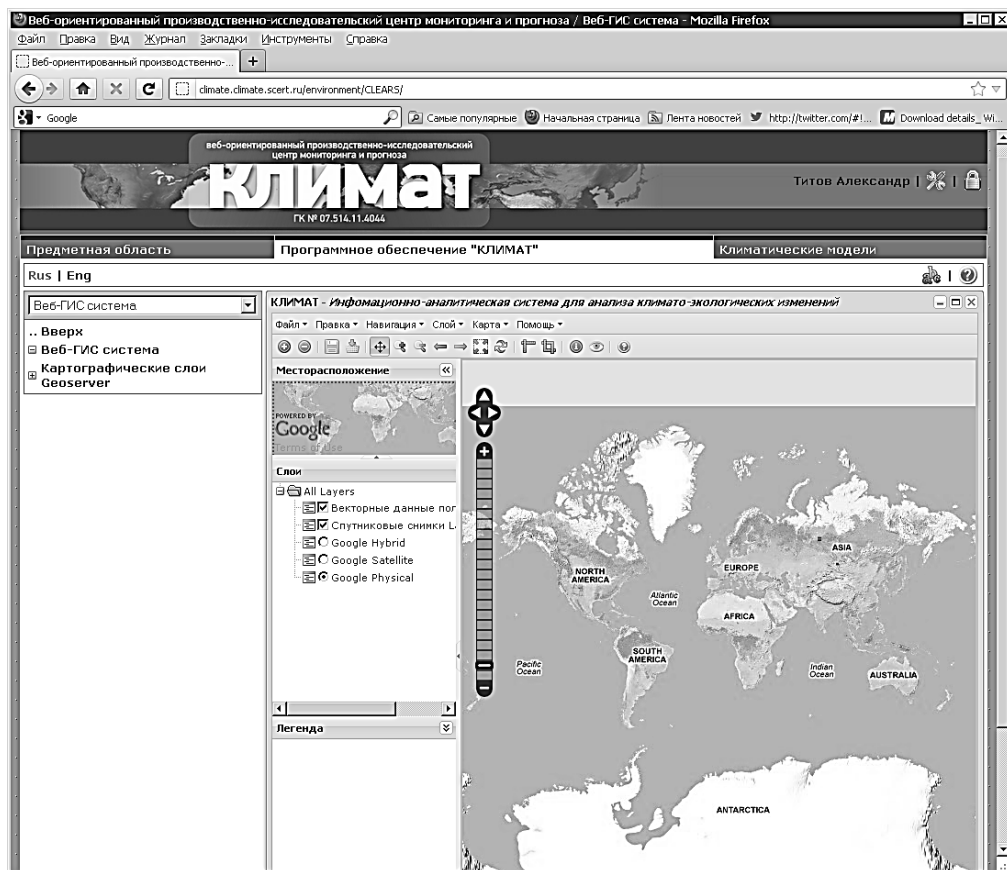


Рис. 11.1. Стартовый экран веб-системы

Далее, пользователь может либо провести анализ полученных результатов, либо продолжить добавлять новые слои на карту. Кроме того, пользователю предоставляется возможность выбирать интересующую географическую область, проводить увеличение и уменьшение масштаба, получать значения со всех слоев в точке, производить дополнительную обработку ранее полученных результатов (например, сравнение данных с различных слоев).

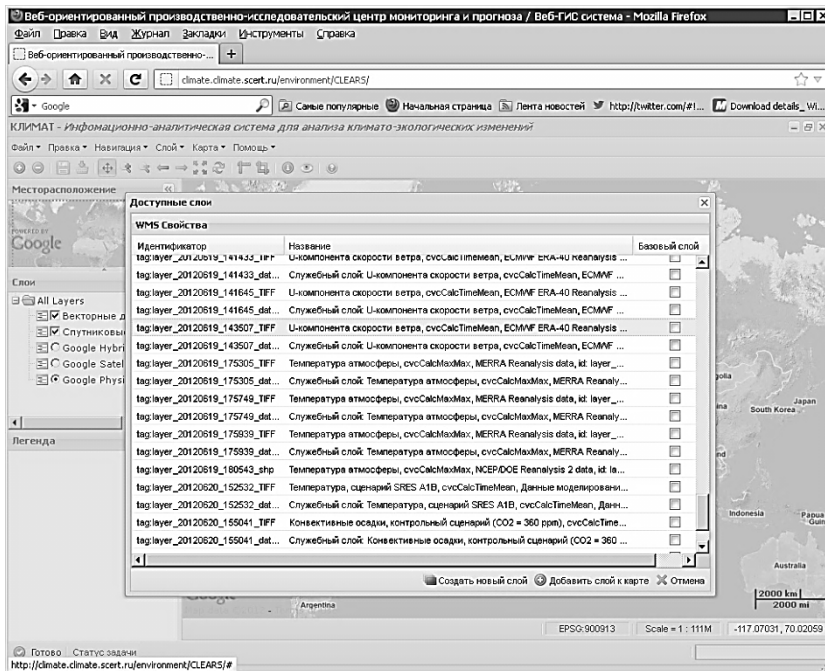


Рис. 11.2. Окно со списком ранее подготовленных слоев

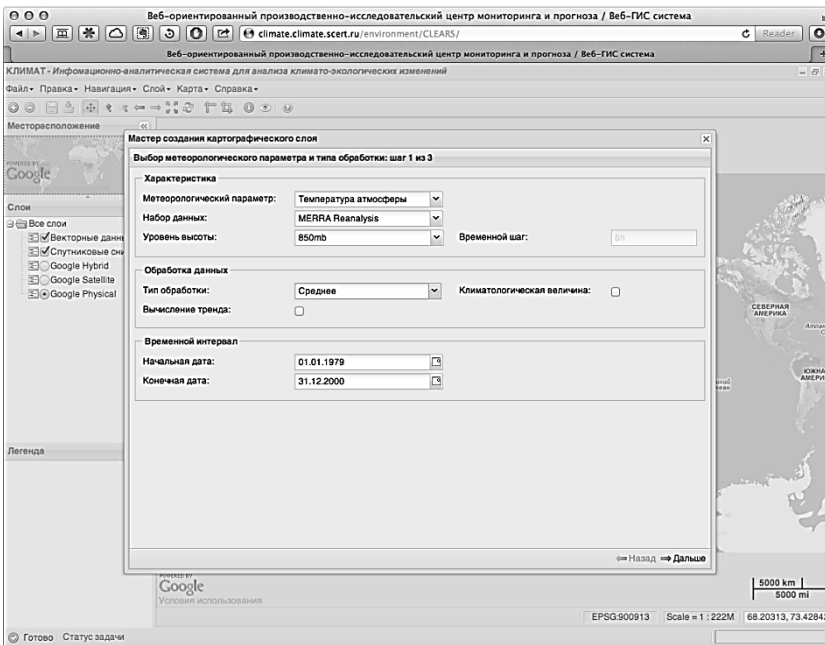


Рис. 11.3. Окно выбора данных и типа их обработки

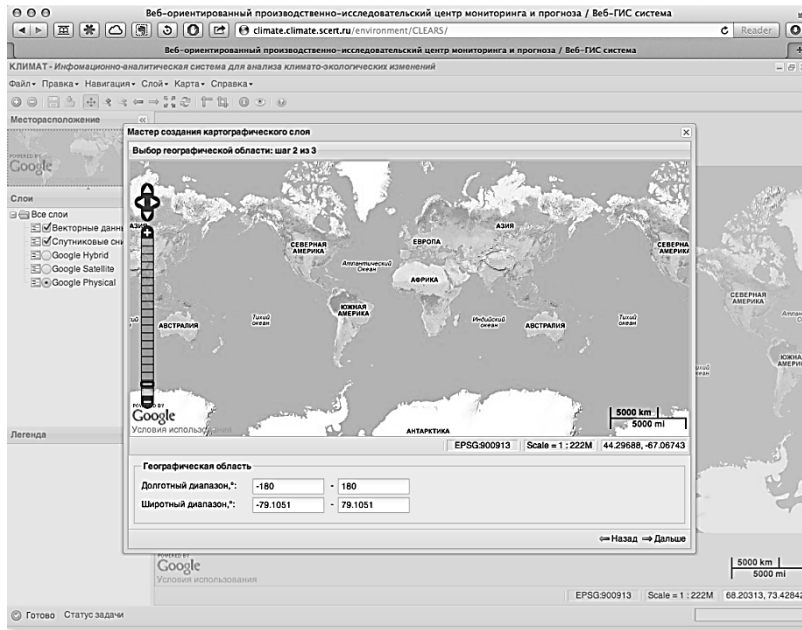


Рис. 11.4. Окно выбора географической области для обработки

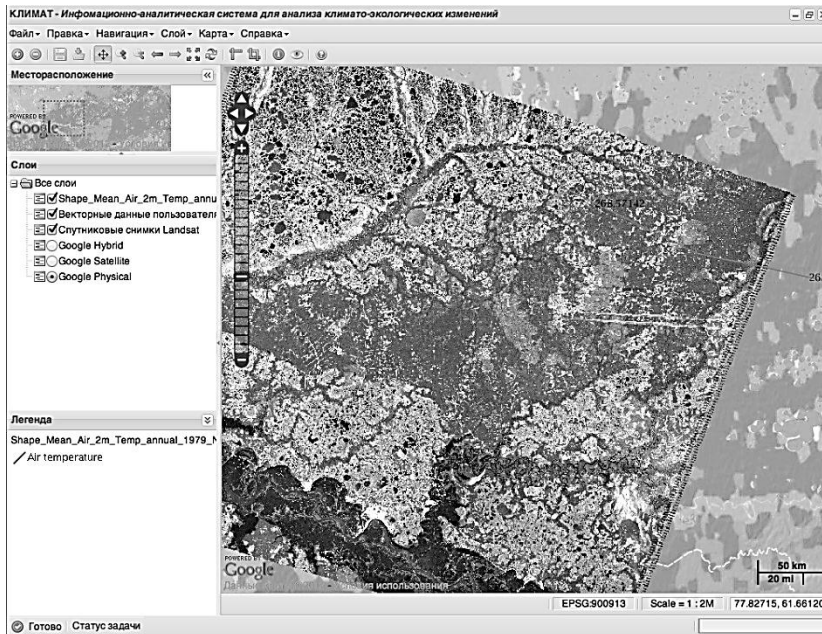


Рис. 11.5. Пример представления результатов обработки в графическом интерфейсе (подложка: GoogleMaps и снимок LandSat с пространственным разрешением 30 м, изолинии: среднегодовая температура воздуха на высоте 2 м по данным реанализа ECMWF ERA-40)

Вычислительно-геоинформационная веб-система является следующим шагом в организации процесса исследования, предоставляя специалистам в различных областях наук об окружающей среде уникальные возможности надежного анализа разнородных геофизических данных. Применение апробированных вычислительных алгоритмов обеспечивает достоверность получаемых в конкретных предметных областях результатов, а доступность системы в Интернете и возможность работы с данными без использования специальных знаний в программировании позволяют широкому кругу ученых сконцентрироваться на решении конкретных задач, не отвлекаясь на рутинные проблемы.

11.6. Вычислительно-геоинформационная веб-платформа «Климат» как шаг к вычислительно-информационной инфраструктуре для наук об окружающей среде

Рассмотренная в предыдущем параграфе тематическая система решает определенные вопросы, возникающие при анализе климатических изменений. Однако простое использование подхода для создания подобных систем для других тематических задач и организация связи между ними еще не создают желаемую инфраструктуру, в которой нуждаются науки об окружающей среде. В такой инфраструктуре должен быть обеспечен доступ к сложным и «тяжелым» с вычислительной точки зрения моделям и результатам соответствующих вычислений. Кроме того, специалистам нужна среда профессионального общения и, конечно же, для воспроизводства научных кадров нужна поддержка профессионального образования (Гордов, Лыкосов, 2007). В отличие от системы, которая является законченным целым, платформа просто объединяет все необходимые приложения, прикладные объекты и другие информационные ресурсы в единое целое и, конечно, допускает их замены и дополнение новыми элементами. Созданный недавно (Гордов и др., 2011, 2012, 2013) экспериментальный образец программно-аппаратной платформы «Климат» обеспечивает вычислительно-информационную поддержку исследований изменений регионального климата, объединяя современные концепции Web 2.0 и возможности доступа к климатическим моделям, большим наборам геофизических данных, средствам визуализации, совместной разработки приложений распределенными научными коллективами, а также организации обучения студентов и аспирантов. При этом доступ для конечного пользователя ко всем функциям платформы обеспечивается через веб-портал с использованием возможностей стандартного браузера.

Платформа представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из следующих основных компонент: 1) распределенное системное программное обеспечение (СПО), представленное веб-ГИС-порталом и распределенным вычислительным ядром; 2) распределенное прикладное программное обеспечение (ППО), размещенное на нескольких серверах и представленное

климатическими и метеорологическими моделями, а также модулями вычислительного ядра, обеспечивающими доступ, обработку и анализ наборов геофизических данных, визуализацию результатов и запись их в выходные файлы; 3) распределенные наборы геофизических данных, представленные результатами численного моделирования и натуральных наблюдений и размещенные на нескольких удаленных серверах по тематическому признаку; 4) аппаратное обеспечение, представленное несколькими системами хранения данных (СХД) вместе с высокопроизводительными вычислительными серверами для их обработки, анализа и визуализации, а также необходимой инфраструктурой, обеспечивающей устойчивое функционирование (источники бесперебойного питания, системы кондиционирования технических помещений) и высокоскоростной интернет-доступ (выделенные серверы, сетевое и кабельное оборудование); 5) специальное программное обеспечение (операционная система, ПО распределения вычислительной нагрузки, управляющее и обслуживающее ПО). В частности, в составе ППО имеются подсистемы для запуска и контроля выполнения численных моделей «WRF» и «Planet Simulator»; программные компоненты для поддержки создания пользователями новых конфигураций численных моделей, интегрированных в Платформу; программные компоненты, обеспечивающие возможность совместной разработки приложений распределенными коллективами (система контроля версий); и подсистемы, реализующие возможности Платформы, связанные с технологией Web 2.0. Последние включают программные компоненты: а) добавления новых ресурсов – пакетов, результатов расчетов, презентаций, статей; б) создания пользовательских групп, для которых обеспечена конфиденциальность – материалы группы доступны только ее членам; в) создания публичных или с ограниченным доступом Wiki-ресурсов и блогов.

В целом веб-платформа предоставляет пользователю широкие возможности: 1) по обработке и анализу наборов геофизических данных, состоящих из наборов геопривязанных климатических и метеорологических величин, полученных в результате численного моделирования, а также данных дистанционного зондирования; 2) проведению совместных исследований с другими пользователями; 3) обмену полученными результатами и использованию в работе собственных наборов данных. Для общения, обмена информацией и совместных исследований в веб-платформе имеются форум и система Wiki для наполнения выделенных разделов веб-сайта собственным содержанием. Кроме того, веб-платформа может использоваться для обучения основам исследования изменений регионального климата и климатообразующих факторов, для чего в ней предусмотрен специальный раздел, содержащий образовательные материалы и интерактивные обучающие курсы. Использование в веб-платформе форматов W3C (World Wide Web Consortium), OGC (Open Geospatial Consortium, <http://www.opengeospatial.org>), ГОСТ Р 52573-2006 и ISO 19115:2003 при описании результатов вычислений и предоставления соответствующих веб-сервисов обеспечивает интероперабельность с другими вычислительно-информационными системами.

Доступ к сервисам, предоставляемым веб-платформой, обеспечивается через любой стандартный браузер с любого компьютера, имеющего выход в Интернет. Клиент-серверная архитектура веб-платформы, построенная с использованием веб-ГИС-технологий, обеспечивает следующие возможности: 1) выбор пользователем наиболее адекватных для рассматриваемого региона наборов геофизических данных (реанализов, климатического моделирования и спутниковых наблюдений) для выявления и анализа возможных климатических, метеорологических (включая экстремальные), экологических и социально-экономических последствий; 2) проведение климатического и метеорологического моделирования с использованием моделей «WRF» и «Planet Simulator»; 3) выполнение статистического анализа современных и прогнозируемых климатических и экологических изменений в выбранном регионе и расчет их характеристик с визуализацией полученных результатов; 4) организация обучения студентов и аспирантов практическим основам исследования климатических и экологических изменений, обеспеченная включением в состав веб-платформы тематических образовательных ресурсов (Мартынова и др., 2012; Шульгина и др., 2012, Гордова и др., 2013), подготовленных для доступа через Интернет с помощью свободно распространяемой образовательной веб-системы MOODLE (<http://www.moodle.org>).

По сути, платформа «Климат» создает прототип того, что получило название «виртуальная исследовательская среда» (virtual research environment). Действительно, она создает для специалистов различных направлений наук, изучающих климатические изменения, такую информационно-вычислительную среду, в которую включены необходимые им для выполнения исследований сервисы и инструменты. Эта среда интегрирует все слои необходимой для работы инфраструктуры (сетевое взаимодействие, данные, вычисления, программное обеспечение и интерфейсы пользователя) и обеспечивает трансдисциплинарную интероперабельность данных.

В заключение необходимо заметить, что за пределами нашего обсуждения осталось два бурно развивающихся в настоящее время направления. Одно из них связано с создаваемой инфраструктурой пространственных данных (ИПД) как универсальной среды предоставления доступа к геопривязанным данным и специализированным сервисам их обработки и визуализации, а второе – с решением тех проблем, которые возникают при работе с очень большими объемами данных.

Требования к общей схеме интерактивного взаимодействия пространственно привязанных данных, метаданных, пользователей и вычислительных сервисов, которая должна обеспечивать их эффективное и гибкое использование, уже сформированы (Steiniger, Hunter, 2012) в схеме, получившей название SDI (Spatial Data Infrastructure, инфраструктура пространственных данных, ИПД). Большинству специалистов уже ясно, что для комплексной вычислительно-информационной поддержки прикладных геофизических исследований, в частности в области климатических изменений, необходимо создание соот-

ветствующей инфраструктуры пространственных данных. Конечно, ИПД определяет принципы разработки сетевой инфраструктуры, позволяющей, в частности пользователю удаленно обрабатывать архивы данных значительного объема и извлекать из них необходимую информацию, однако, ситуация с созданием элементов ИПД для климатической науки далека от завершения.

Очевидно, что элементы требуемой программной инфраструктуры должны удовлетворять общим требованиям архитектуры ИПД (Кошкарев и др., 2010; Steiniger, Hunter, 2012). Это подразумевает использование современных технологий обработки геофизических данных, позволяющих интегрировать различные программные решения для организации таких информационных ресурсов. Единой точкой доступа к пространственно-привязанным геофизическим данным и продуктам их обработки в рамках концепции ИПД является тематический геопортал (Кошкарев и др., 2010; Краснопеев, 2011), предоставляющий возможность поиска геоинформационных ресурсов (наборов и источников данных) по каталогам метаданных, формирования выборок пространственных данных по их характеристикам (функциональность доступа), а также управления сервисами и приложениями обработки данных и картографической визуализации (Кошкарев, 2008).

Следует отметить, что в силу ряда объективных причин (большой объем наборов данных; сложность используемых моделей их организации; различия в синтаксисе и семантике, затрудняющие создание и использование общей терминологии) разработка сервисов доступа и обработки данных в области наук о Земле (геопроессинга) не является тривиальной задачей. Эти обстоятельства замедляют создание тематических вычислительно-информационных систем, обеспечивающих комплексную поддержку геофизических исследований на базе современных веб- и ГИС-технологий в рамках геопорталов ИПД. Однако работа в этом направлении уже начата (Титов и др., 2012) и есть надежда, что уже в ближайшее время ее первые результаты будут использованы, в частности, в платформе «Климат», в которой существующий веб-портал станет полноценным тематическим геопорталом – точкой доступа к метеорологическим и климатическим данным и вычислительным сервисам в рамках создаваемой национальной и академической ИПД.

Что же до вызовов уже пришедшей эры больших объемов геофизических данных, то здесь пока больше проблем и вызванных ими вопросов, чем внятных ответов. Пока ясно одно: создаваемые вычислительно-информационные системы обработки и анализа геофизических данных должны стать частью центров данных и, возможно, инициатива ВМО по созданию многоуровневой сети таких центров должна быть немного дополнена – это должны быть центры данных и их обработки. Кроме того, по мере развития систем глобального и регионального климатического моделирования и поддерживающих его вычислительных ресурсов, стоит готовить возможность удаленного запуска таких моделей для ситуации, интересующей конкретного пользователя. Отдельного исследования заслуживает и вопрос о том, должна ли одна и та же тематическая вычисли-

тельно-информационная система обслуживать все типичные группы пользователей (исследователи, обучаемые и лица, принимающие решения). В силу разного типа возникающих задач, может быть, более эффективно будет организовать их адресацию на системы разного уровня. В целом в данной области науки уже наступило время перемен, а опыт учит, что для ученых это очень благоприятный период.

ЛИТЕРАТУРА

- Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М.* Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2011. Т. 9, вып. № 1. С. 56, 66.
- Гордов Е.П., Лыкосов В.Н.* Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для интегрированного исследования окружающей среды Сибири // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, спец. вып. 2: Информационные технологии для эколого-биологических исследований. С. 19–30.
- Гордов Е.П., Лыкосов В.Н.* Информационно-вычислительные технологии для наук об окружающей среде: синтез науки и образования // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, спец. вып. № 3. С. 3–11.
- Гордов Е.П., Лыкосов В.Н., Крупчатников В.Н., Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М.* Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий. Новосибирск : Наука, 2013. 199 с.
- Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Богомолов В.Ю., Шульгина Т.М., Генина Е.Ю.* Геоинформационная веб-система для исследования региональных природно-климатических изменений и первые результаты ее использования // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 137–143.
- Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г.* Использование веб-ГИС-технологий для разработки информационно-вычислительных систем для анализа пространственно-привязанных данных // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2011. Т. 9, вып. № 4. С. 60–67.
- Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г.* Разработка элементов информационно-вычислительной системы на основе веб-технологий для исследования региональных природно-климатических процессов // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, спец. вып. № 3. С. 20–28.
- Гордов Е.П., Фазлиев А.З.* Научные информационные ресурсы для поддержки исследований об атмосфере в сети Интернет // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9, ч. 1, спец. вып. С. 123–136.
- Гордова Ю.Е., Генина Е.Ю., Горбатенко В.П., Гордов Е.П., Кузевская И.В., Мартынова Ю.В., Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М., Барашкова Н.К.* Поддержка образовательного процесса в области современной климатологии на основе веб-ГИС-платформы «Климат» // Открытое дистанционное образование. 2013. № 1 (49). С. 14–19.
- Гордов Е.П., De Rudder A., Лыкосов В.Н., Фазлиев А.З., Fedra K.* Веб-портал АТМОС, как основа для выполнения интегрированных исследований по окружающей среде Сибири // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9, ч. 1, спец. вып. С. 3–14.
- Зайцев А.С., Мелешко В.П., Ильин Б.М., Махоткина Е.Л., Надежина Е.Д., Решетников А.И., Светлова Т.П.* Система наблюдений за климатом в России // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1 : Изменения климата. М. : Росгидромет, 2008. С. 19–30.
- Краснопеев С.М.* Опыт развертывания ключевых элементов инфраструктуры пространственных данных на базе веб-служб // Труды XIV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2011). СПб., 2011. С. 92–99.
- Кошкарев А.В.* Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Пространственные данные. 2008. № 2. С. 6–14.

- Кошкарев А.В., Ряховский В.М., Серебряков В.А. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных // Открытое образование. 2010. № 5. С. 61–73.
- Мартынова Ю.В., Гордов Е.П., Крупчатников В.Н., Шульгина Т.М. Анализ климата будущего : учеб.-метод. пособие. Томск : Томский государственный университет, 2012. 20 с.
- Окладников И.Г., Титов А.Г., Мельникова В.Н., Шульгина Т.М. Веб-система для обработки и визуализации метеорологических и климатических данных // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, спец. вып. № 3. С. 64–69.
- Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Богомоллов В.Ю., Мартынова Ю.В., Сущенко С.П., Скворцов А.В. Программный комплекс анализа и визуализации данных мониторинга и прогноза климатических изменений // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 123–131.
- Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Информационно-вычислительная система для хранения, поиска и аналитической обработки данных по окружающей среде, основанная на технологиях SEMANTIC WEB // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). КУЗБАСС-3. 2009. № ОВ18. С. 162–165.
- Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Использование технологий Semantic Web в информационно-вычислительной системе для анализа данных по окружающей среде // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2010. Т. 8, вып. № 1. С. 60–67.
- Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Программно-аппаратная платформа «Климат» как основа геопортала локальной инфраструктуры пространственных данных // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2012. Т. 10, вып. № 4. С. 104–111.
- Шокин Ю.И., Антонов В.Н., Добрецов Н.Н., Кихтенко В.А., Лагутин А.А., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л., Чубаров Л.Б. Распределенная система приема и обработки спутниковых данных Сибири и Дальнего Востока. Текущее состояние и перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 45–54.
- Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Генина Е.Ю., Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Ахметшина А.С. Комплекс программ для анализа региональных климатических изменений // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2013. Т. 11, вып. № 1. С. 124–131.
- Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Анализ региональных изменений климата : учеб.-метод. пособие. Томск : Томский государственный университет, 2012. 25 с.
- Хвостова Р.Н., Семенюк Е.А. Характеристики температурно-влажностного режима для мониторинга климата (по данным суточного разрешения) // Информационный сайт ГУ «ИГКЭ» Росгидромета и РАН. 2007. URL: <http://climatechange.igce.ru>
- Якубайлик О.Э. Геоинформационный Интернет-портал // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, спец. вып. № 3. С. 116–125.
- Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.В. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2008. № 1 (4). С. 375–384.
- Adamov D.P., Akhlyostin A.Yu., Fazliev A.Z., Gordov E.P., Karyakin A.S., Mikhailov S.A., Rodimova O.B. Information-computational system: atmospheric chemistry // Proceedings of SPIE 6 International Conference Atmospheric and Ocean Optics. 1999. V. 3983. P. 578–581.
- Berrick S.W., Leptoukh G., Farley J.D., Rui H. Giovanni: A Web service workflow-based data visualization and analysis system // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. V. 47, No. 1. P. 106–113.
- Dianskii N.A., Galin V.Ya., Gusev A.V., Smyshlyayev S.P., Volodin E.M., Iakovlev N.G. The model of the Earth system developed at the INM RAS // Russ. Journal Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25, no. 5. P. 419–429.
- Dragicvic S., Balram S., Lewis J. The role of Web GIS tools in the environmental modeling and decision-making process // 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Alberta, Canada, September 2–8. 2000.
- Fraedrich K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., Lunkeit F. The Planet Simulator: Towards a user friendly model // Meteorologische Zeitschrift. 2005. V. 14, No. 3. P. 299–304.
- Frans J.M., van der Wel. Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data // Meteorological Applications. 2005. V. 12, No. 1. P. 7, 8.

- Gordov E.P., Vaganov E.A.* Siberia Integrated Regional Study: multidisciplinary investigations of the dynamic relationship between the Siberian environment and global climate change // *Environmental Research Letters*. 2010. V. 5 (1), No. 015007. doi: 10.1088/1748-9326/5/1/015007
- Gordov E.P., Lykosov V.N., Fazliev A.Z.* Web portal on environmental sciences “ATMOS” // *Advances in Geosciences*. 2006. V. 8. P. 33–38.
- Gordov E.P., Golovko V.F., Rodimova O.B., Fazliev A.Z.* Information-computational system “Integrated model of atmospheric optics” as a background for propagation problems // *Optical waves propagation and adaptive systems*. SPIE. 2000. V. 4338. P. 47–56.
- Gordov E. and Coauthors.* Development of Information-Computational Infrastructure for Environmental research in Siberia as a baseline component of the Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI) Studies / *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* // Series: Springer Environmental Science and Engineering / P.Ya. Groisman, G. Gutman (eds.). 2013. V. 12. P. 19–55.
- Gordov E.P., Fazliev A.Z., Lykosov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G.* Development of web based information-computational infrastructure for Siberia Integrated Regional Study / *Environmental Change in Siberia* // *Earth Observation, Field Studies and Modelling*, Series: *Advances in Global Change Research*. 2010. V. 40. P. 233–252.
- Gupta A., Marciano R., Zaslavsky I., Baru C.* Integrating GIS and Imagery through XML-Based Information Mediation // *Integrated Spatial Databases: Digital Images and GIS*. Lecture Notes in Computer Science / P. Agouris, A. Stefanidis (eds.). 1999. 1737 p.
- Peng Z.-R., Tsou M.-H.* Internet GIS – Distributed Geographic Information Systems for the Internet and Wireless Networks. N.Y. : John Wiley & Sons, 2003. 679 p.
- Ramapriyan H.K., Behnke J., Sofinowski E., Lowe D., Esfandiari M.A.* Evolution of the Earth Observing System (EOS) Data and Information System (EOSDIS) // *Standard-Based Data and Information Systems for Earth Observation: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* / D. Liping, H.K. Ramapriyan (eds.). Springer-Berlin, Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-540-88264-0_5.
- Samet R., Tural S.* Web based real-time meteorological data analysis and mapping information system // *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*. 2010. V. 7, No. 9. P. 1115–1125.
- Sillmann J., Roeckner E.* Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change // *Climatic Change*. 2008. V. 86. P. 83–104.
- Simmons A.J., Jones P.D., da Costa Bechtold V. et al.* Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature // *Journal of Geophysics Research*. 2004. Vol. 109 (D24). doi: 10.1029/2004JD005306.
- Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P.* Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // *Environmental Research Letters*. 2011. V. 6. 045210 (7 p.). doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045210.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.* Description of the Advanced Research WRF Version 3 // *Technical note NCAR/TN-475+STR*, NCAR. 2008. 125 p.
- Steiniger S., Hunter A.J.S.* Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure / E. Bocher, M. Neteler (eds.). // *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*. LNCG, Heidelberg, Springer, 2012. P. 247–261.
- Thorne P.W. and Coauthors.* Guiding the Creation of A Comprehensive Surface Temperature Resource for Twenty-First-Century Climate Science // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2011. V. 92. ES40-ES47. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011BAMS3124.1>.
- Titov A., Gordov E., Okladnikov I., Shulgina T.* Web-system for processing and visualization of meteorological data for Siberian environment research // *International Journal of Digital Earth*. 2009. V. 2, No. S1. P. 105–119.
- Vatsavai R.R., Burk Th.E., Wilson B.T., Shekhar S.* A Web-based rowising and spatial analysis system for regional natural resource analysis and mapping // *Abstracts of reports at the 8th ACM Symposium on Advances in geographic information systems*. US : Washington, D.C., 2000. P. 95–101.
- Welp L.R., Randerson J.T., Finlay J.C. et al.* A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32 (L14401). doi:10.1029/2005GL022857.