

## Разработка элементов виртуальной исследовательской среды для анализа, оценки и прогнозирования последствий глобальных климатических изменений

Е. П. ГОРДОВ<sup>1,2,3,\*</sup>, И. Г. ОКЛАДНИКОВ<sup>1,2,3</sup>, А. Г. ТИТОВ<sup>1,2,3</sup>, А. З. ФАЗЛИЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск Россия

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

\*Контактный e-mail: gordov@scert.ru

Представлены описание и первые результаты разработки виртуальной вычислительно-информационной среды для анализа, оценки и прогноза последствий глобальных климатических изменений окружающей среды и климата в выбранном регионе. Созданная среда основана на информационных ресурсах трехслойной архитектуры.

*Ключевые слова:* виртуальная исследовательская среда, большие наборы данных об окружающей среде, изменения климата.

### Введение

Происходящие и ожидаемые изменения климата и их влияние на человечество привели к бурному развитию технологий измерения и моделирования различных характеристик окружающей среды. Одним из следствий этого стало увеличение разнообразия и объемов наборов геопространственных данных, получаемых в результате измерений и численного моделирования [1]. Для понимания и прогнозирования климатических процессов и их последствий требуется анализ таких наборов данных об окружающей среде, объем которых в настоящее время уже измеряется в петабайтах [2–5]. Исходная мультидисциплинарность климатических исследований приводит к необходимости осуществлять поиск, обмен, обработку, анализ и визуализацию таких наборов данных. Подобные задачи сегодня практически невозможно выполнять на рабочем месте исследователя с использованием традиционных подходов [6]. Это обстоятельство требует применения в науках об окружающей среде новых подходов и инструментов, разрабатываемых для областей науки с интенсивным использованием данных [7–11]. Объемы, разнообразие и скорость появления современных климатических данных подпадают под модель 5V (Volume, Velocity, Variety, Variability, Veracity) [11] и позволяют уже говорить о них с учетом их географической привязки как о “больших геопространственных данных” [12].

Для комплексного использования больших наборов геопространственных метеорологических и климатических данных необходимо создать распределенную программную

среду [13, 14], основанную на инфраструктуре пространственных данных (ИПД) [15]. Геопортал ИПД [16, 17] является единой точкой входа, предоставляющей функции поиска географических информационных ресурсов, выборки данных согласно заданным параметрам (функции доступа к данным), а также обработки и картографической визуализации в виде соответствующих сервисов и клиентских приложений [18]. Считается, что клиентские приложения как элементы такой инфраструктуры должны разрабатываться с использованием современных веб- и ГИС-технологий [19–23]. В соответствии с требованиями директивы INSPIRE к визуализации пространственных данных [24] клиентское приложение должно обеспечивать такие функциональные возможности, как просмотр данных, навигация, прокрутка, масштабирование и наложение графических слоев, а также отображение легенды и соответствующих метаданных, т. е. иметь базовую функциональность стандартной ГИС.

Существует несколько информационных систем и сервисов, предоставляющих подобную функциональность. Например, распределенная информационно-аналитическая система для поиска, обработки и анализа пространственно-распределенных данных, основанная на комбинации ГИС и веб-технологий, разрабатывается в Институте вычислительных технологий СО РАН и Институте геологии и минералогии СО РАН [25]. Система GeoBrain Online Analysis System (GeOnAS) предоставляет доступ к данным спутниковых наблюдений (NASA, USGS) через сервисы Open Geospatial Consortium (OGC), построенные на базе программного обеспечения (ПО) с открытым кодом GRASS GIS, и оснащена веб-интерфейсом, основанным на библиотеке DHTMLX (<http://dhtmlx.com/>). Сервис ncWMS [26] — это реализация сервиса OGC Web Map Service (WMS) для геопространственных наборов данных, представленных в формате netCDF. Он активно используется для визуализации данных в рамках геопорталов ИПД, но, к сожалению, слабо поддерживается стандартными ГИС. Портал Unidata THREDDS (<http://www.unidata.ucar.edu/software/thredds/current/tds/TDS.html>) предоставляет доступ к геопространственным данным и метаданным по OPeNDAP, OGC WMS и OGC Web Coverage Service (WCS). Этот продукт поддерживает выборку данных также с использованием ncWMS для визуализации результатов.

Открытая распределенная архитектура Boundless / OpenGeo широко применяется для разработки сложных геоинформационных приложений [27, 28]. Она состоит из трех уровней (данные, сервер приложений и графический интерфейс) и опирается на открытое программное обеспечение: Geoserver (<http://geoserver.org>) и Geowebcache, — реализующее сервисы OGC WMS, WFS, Web Processing Service (WPS); JavaScript-библиотеку OpenLayers (<http://openlayers.org/>), которая обеспечивает базовую функциональность “тонкого” веб-ГИС-клиента, и JavaScript-библиотеку GeoExt / ExtJS library [29] для разработки клиентских веб-приложений с интуитивно понятным графическим интерфейсом пользователя. Ни одна из существующих систем не может в принципе решать весь спектр задач, возникающих в области климато-экологического мониторинга, поэтому нужно создавать тематически-направленные системы, удовлетворяющие необходимым требованиям к общей схеме интерактивного взаимодействия геопространственных данных, метаданных, пользователей и вычислительных инструментов.

Разработка доступных через Интернет тематических информационных веб-ГИС, а также организация обмена данными и знаниями между ними является перспективным способом создания распределенной среды поддержки междисциплинарных исследований в области наук о Земле. В последнее время такая среда все чаще называется виртуальной исследовательской средой (ВИС) [30, 31].

Для решения прикладных задач, имеющих отношение к климатическим информационным ресурсам в такой среде, требуются их трехслойное представление [32] и использующие онтологии системы управления экстенсивными данными [33], необходимые для систематизации и визуализации свойств этих данных [34]. Детальный анализ онтологического подхода к решению информационных задач геонаук дан в ряде публикаций, например [35–38]. Отметим, что применение онтологий, в частности, решает проблему семантической неоднородности, присущую многим геопорталам [35], и способствует организации веб-сервисов, работающих с инфраструктурой пространственных данных [39].

В настоящей работе приводятся первые результаты разработки методов и подходов к созданию надежных и доступных инструментов формирования (элементов) тематической ВИС (веб-ГИС для изучения климатических изменений и их последствий). Для исследователей, работающих в научных областях, ориентированных на изучение климатических изменений и оценку их последствий, и лиц, как разрабатывающих стратегии адаптации к последствиям изменений, так и принимающих решения, эта ВИС должна предоставлять достоверные и подробные климатические характеристики выбранного региона, возможность их углубленного статистического анализа и исследования последствий изменения климата. По нашему мнению, представленная ниже ВИС является основой для получения корректной климатической информации, необходимой для изучения экономических, политических и социальных последствий глобального изменения климата на региональном уровне.

В рамках описания ВИС приведены схема хранения больших наборов геопро пространственных данных, созданная база метаданных, графический веб-ГИС-клиент пользователя и реализация алгоритмов анализа и сравнения характеристик экстремальных явлений. В слой знаний созданной среды входят прикладные OWL-онтологии, описывающие коллекции климатических и метеорологических данных [40, 41], и онтологии свойств входных и выходных данных двух прикладных задач [42, 43], предназначенные для построения базы знаний системы поддержки принятия решений.

## 1. Слой данных. Организация хранения данных

Выделяют два основных способа хранения геопро пространственных данных: в виде геопро пространственных баз данных и в виде наборов двоичных файлов прямого доступа, содержащих непосредственно поля данных. На использование геопро пространственных баз данных для хранения геопро пространственной информации опираются такие проекты, как Apache HBase, Esri Geodatabase, Paradigm4, SciDB и т. д. При таком подходе поля данных предварительно преобразуются и вносятся в базу данных до их непосредственного использования, что может потребовать значительного времени и дополнительного дискового пространства. Второй способ хранения геопро пространственных данных заключается в использовании традиционных коллекций файлов с данными в рамках типовой файловой системы. В случае геопро пространственных данных обычно используются самоописательные форматы файлов, содержащие помимо самих данных их метаданные. Показано [44], что скорость выборки фрагментов данных объемом более 40 МБ из пространственной базы данных может быть ниже, чем при непосредственном чтении из набора файлов с данными.

Несмотря на то что для выполнения различных операций с коллекциями отдельных файлов требуются разработка и использование дополнительных программных компо-

ентов, предоставляющих программные интерфейсы (API) для записи, чтения и обработки распределенных файловых наборов, нами выбран именно этот подход за относительную простоту его реализации и более высокую скорость выборки больших фрагментов данных.

В качестве основного самоописательного формата файлов для хранения данных взят формат Network Common Data Form (netCDF), принятый различными научными организациями, и OGC как стандартный формат хранения и обмена геопространственными данными. Наборы netCDF-файлов, содержащие геопространственные данные, располагаются в рамках файловой системы в следующей иерархии каталогов:

```
<путь к корневому каталогу с данными>/  
  <название архива данных>/  
    <горизонтальное разрешение>/  
      <разрешение по времени>/  
        <набор файлов и каталогов с данными>
```

Здесь <путь к корневому каталогу с данными> определяется системным администратором, <название архива данных> задает имя каталога, содержащего все данные одного архива данных, <горизонтальное разрешение> задает имя каталога, содержащего данные с одним горизонтальным разрешением, <разрешение по времени> — имя каталога, содержащего данные с одним шагом по времени. Далее, по иерархии располагаются файлы с данными. Имена файлов и подкаталогов не регламентируются и определяются индивидуальными особенностями конкретного набора данных. Каждый файл содержит многомерный массив геопривязанных значений одного или нескольких метеорологических параметров. Такое размещение файлов упорядочивает хранение данных, заданных на различных пространственно-временных масштабах, и обеспечивает корректную поэтапную выборку требуемых поднаборов с использованием базы метаданных и графического интерфейса пользователя.

## 2. Информационный слой. База метаданных

Для описания наборов геопространственных данных и процедур их обработки, а также обеспечения эффективного функционирования ВИС разработана специализированная база метаданных [45]. Эта база включает: перечень метеорологических величин, содержащихся в наборах данных; описание пространственно-временных доменов, на которых они заданы; полные пути к соответствующим файлам с данными, а также перечень и взаимосвязи настроечных параметров программных компонентов для анализа данных. Под “набором данных” подразумевается совокупность массивов данных, заданных на единой временной и пространственной сетках, на едином временном интервале и полученных при одних и тех же условиях моделирования. Он может быть представлен как одним, так и несколькими однотипными файлами. Каждый файл содержит один или несколько метеопараметров в виде многомерных массивов, снабженных метаданными. Состав метеопараметров и длина временного интервала, а также названия метеопараметров во всех файлах, входящих в один набор данных, одинаковые. Под метеопараметром подразумевается стандартизованное название метеорологической величины: температура, давление, влажность и т. д. Эти величины содержатся в файлах формата netCDF в виде многомерных переменных, имеющих собственные названия, носящие порой абстрактный характер. Дополнительно в netCDF-файле присутствуют

особые переменные, содержащие горизонтальные и вертикальные сетки, а также сетку по времени.

Наборы данных с различным пространственным и/или временным разрешением, полученные в рамках одного проекта, объединяются в коллекции. Под коллекцией данных подразумевается совокупность наборов данных, полученных в одной организации в рамках одного проекта и заданных с разным пространственным и/или временным шагом, а также для различных климатических сценариев. Коллекция может состоять из одного набора данных.

Все таблицы в базе метаданных можно условно разделить на технические (содержат данные, необходимые для функционирования вычислительного блока ВИС) и интерфейсные (содержат данные, используемые для наполнения элементов графического интерфейса пользователя). Для поддержки многоязычного графического интерфейса пользователя ряд интерфейсных таблиц может содержать строковые записи на различных языках.

Набор климатических данных определяется совокупностью четырех характеристик: названием коллекции, в которую он входит, горизонтальным разрешением, шагом сетки по времени и названием сценария (если это применимо). Он включает в себя один или несколько многомерных массивов данных и содержит значения метеопараметра, заданные на пространственной и временной сетках.

Обработка геопространственных данных выполняется с использованием вычислительного блока ВИС. Для того чтобы передать данные на обработку, необходимо подготовить специализированный файл-задание в формате XML согласно специально разработанной XML-схеме. Этот файл содержит описание и уникальную для каждого вида обработки последовательность вызова различных процедур обработки данных и их параметры. В базе метаданных содержатся перечень допустимых параметров процедур-обработчиков и порядок расположения шаблонных файлов, на основе которых подготавливаются файлы-задания, а также задаются взаимосвязи между метеопараметрами и обработчиками, определяющие дополнительные ограничения на возможность обработки того или иного набора.

### 3. Информационный слой. Веб-ГИС-клиент

Разработанное картографическое веб-приложение (веб-ГИС-клиент) основано на архитектуре Boundless / OpenGeo и может быть представлено в виде трех основных функциональных уровней [46]:

- уровень метаданных netCDF в формате JSON;
- уровень промежуточного ПО, предоставляющего методы для работы:
  - с метаданными;
  - файлом-заданием в формате XML;
  - картографическими сервисами WMS/WFS;
- уровень графического интерфейса пользователя, представленного JavaScript-объектами, реализующими общую логику работы приложения.

Веб-ГИС-клиент соответствует общим требованиям стандарта INSPIRE и обеспечивает запуск сервисов обработки данных для задач мониторинга окружающей среды и исследования изменений климата, а также отображения результатов обработки в виде картографических слоев WMS/WFS в растровом (PNG, JPG, GeoTIFF), векторном (KML, GML, Shape) и двоичном (netCDF) форматах.

### 3.1. Уровень метаданных netCDF

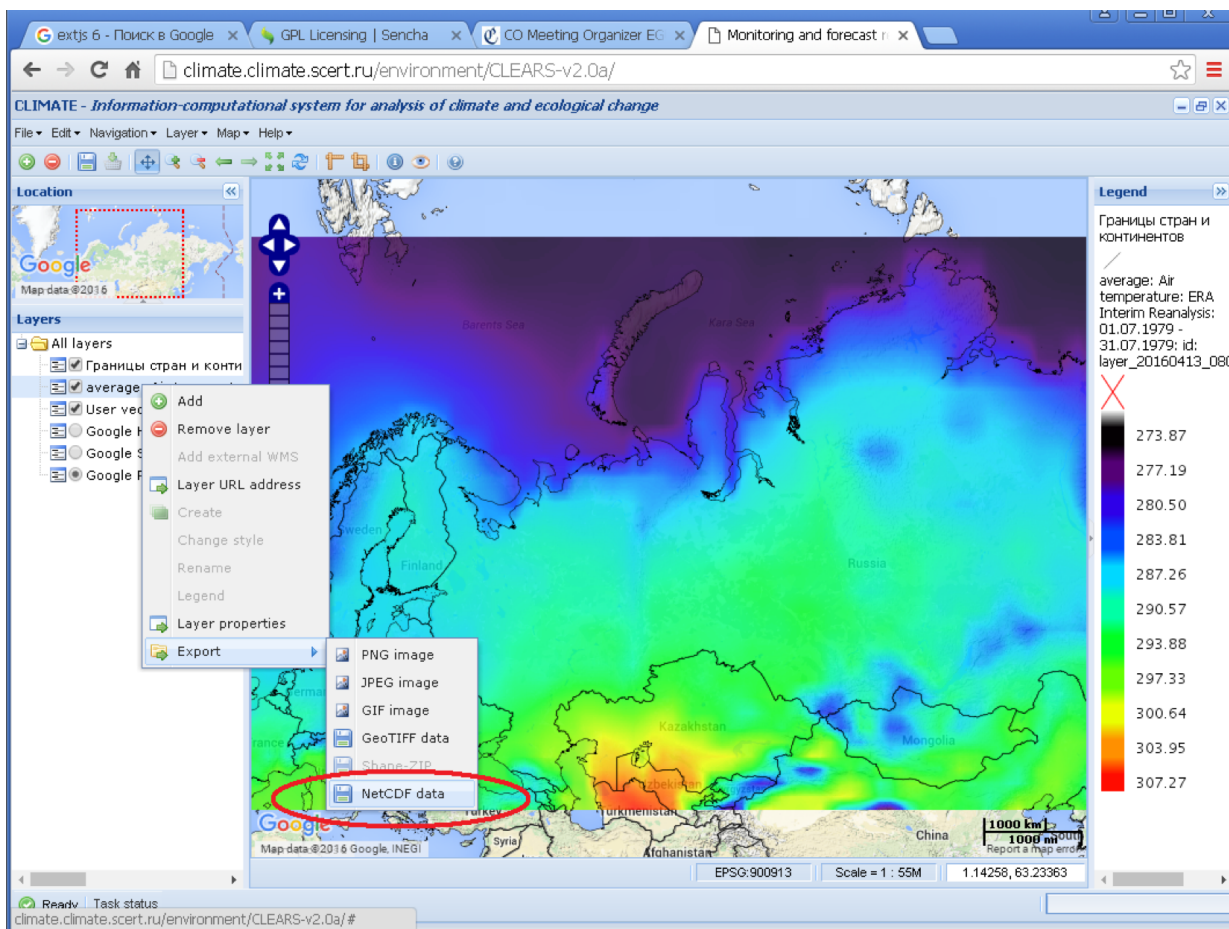
Уровень метаданных netCDF веб-ГИС-клиента представляет собой набор взаимосвязанных JSON-объектов, созданных на основе MySQL-базы метаданных и содержащих информацию о наборах геопространственных данных (пространственное и временное разрешения, перечень доступных метеопараметров, перечень доступных процедур обработки и т. д.). В общем случае возможны два типа объектов:

- объекты, имеющие структуру, эквивалентную соответствующим таблицам и отношениям в базе метаданных;
- объекты, созданные на основе сложных SQL-запросов к базе метаданных, позволяющие быстро получать необходимую информацию из базы метаданных, используя MySQL-индексы как ключи в ассоциативном массиве.

Структура JSON-объектов выбрана на основе следующих критериев:

- эффективность заполнения интерактивных форм в графическом интерфейсе пользователя;
- оптимизация процесса создания и редактирования XML-файла, описывающего конфигурацию обработки данных (XML-файл-задание).

Таким образом, на данном уровне веб-ГИС-клиента оптимизируются процессы взаимодействия пользователя с базой метаданных через графический интерфейс.



Графический интерфейс пользователя веб-ГИС-клиента. Демонстрация экспорта слоя в формат netCDF

### 3.2. Уровень промежуточного ПО

На этом уровне реализуются методы работы с метаданными netCDF, XML-файлом-заданием и картографическими сервисами WMS/WFS. Он представляет собой промежуточное ПО, связывающее уровень представления метаданных в формате JSON с уровнем графического интерфейса пользователя. Методы, реализованные на этом уровне, обеспечивают:

- загрузку и обновление JSON-объектов метаданных, используя технологию AJAX;
- создание, редактирование и сериализацию объекта XML-задания;
- запуск и контроль выполнения задачи обработки данных на удаленном вычислительном узле;
- работу с картографическими сервисами WMS/WFS (получение списка доступных слоев, отображение слоев на карте, экспорт слоев в различные форматы по запросу пользователя, получение и отображение легенды слоя с выбранным SLD-стилем).

### 3.3. Графический интерфейс пользователя

Этот уровень основан на объединении JavaScript-библиотек, таких как OpenLayers, GeoExt и ExtJS, и представляет собой набор программных компонентов, как независимых (информационные панели, кнопки, списки слоев и т. п.), так и реализующих общую логику приложения (меню, панели инструментов, мастера (wizards), обработчики сообщений мыши и клавиатуры и т. д.). Графический интерфейс выполняет две основные функции: предоставление функциональных возможностей для редактирования XML-файла-задания и представление картографической информации конечному пользователю. Внешне он похож на интерфейсы таких популярных классических ГИС-приложений, как uDig, QuantumGIS и т. д. Основные элементы графического интерфейса пользователя представлены на рисунке.

### 3.4. Применение ВИС в задачах регионального климатического мониторинга

В рамках ВИС для обработки и анализа доступно несколько наборов геопривязанных данных: реанализы американских Национальных центров по прогнозированию состояния окружающей среды NCEP-DOE AMIP-II и NCEP CFSR; реанализы Японского метеорологического агентства JMA/CRIEPI JRA-25 и JRA-55; реанализы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF ERA-40 и ECMWF ERA Interim; данные проекта MRI/JMA “Водные ресурсы APHRODITE” японского Метеорологического исследовательского института; глобальные данные по осадкам климатологического центра Германской службы погоды DWD GPCP; реанализ американского Управления по глобальному моделированию и усвоению данных GMAO MERRA; реанализ совместного проекта по мониторингу состава атмосферы и изменений климата под руководством европейского центра по Глобальному мониторингу состояния окружающей среды и безопасности GMES MACC; глобальный реанализ двадцатого столетия Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA-CIRES, версия 2; данные локальных наблюдений с метеостанций, расположенных на территории бывшего СССР, а также результаты моделирования, полученные с использованием некоторых глобальных и региональных климатических моделей. Благодаря гибкости и модульно-

сти системы перечень наборов данных, доступных для обработки, может оперативно дополняться.

Обработка данных выполняется независимыми специализированными модулями вычислительного ядра. Эти модули вызываются вычислительным ядром через унифицированный программный интерфейс (API) согласно заданию, сформированному графическим интерфейсом по командам пользователя. В модулях реализован расчет основных статистических характеристик (среднее значение, среднеквадратическое отклонение, наивысшее и наименьшее значения метеовеличины) [47] и показателей временной структуры метеорологических рядов (повторяемость и непрерывная продолжительность атмосферного явления со значениями метеорологических величин выше или ниже заданных значений в пределах выбранного периода времени) [48], отражающих закономерности изменения случайных величин во времени и в пространстве. 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 [47]. Важным для приложений является получение сведений об экстремальных явлениях и их вероятностных характеристиках [49].

Анализ индексов климатических изменений, основанных на значениях суточной температуры и суточного количества осадков, позволил сформировать набор вычислительных модулей для их расчета. Некоторые индексы вычисляются для фиксированных пороговых значений, 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 [49]. Такая последовательность процедур, включающая вычисление климатических показателей и изучение их пространственной и временной динамики, позволяет получить достаточно полное представление об особенностях происходящих изменений климата изучаемого региона.

Разработанные элементы ВИС неоднократно использовались при исследовании современных региональных климатических изменений и подготовке студентов профильных специальностей [50–55]. В частности, ее применение позволило исследователям выполнять сложный статистический анализ больших многомерных массивов пространственных данных без предварительного скачивания архивов и их обработки на своих ПК и представлять результаты исследований в табличном и графическом виде, допускающем анализ значений в конкретных географических точках. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами, представленными в научной литературе, и качественно улучшают их. Благодаря модульной организации компонентов и непрерывному взаимодействию исследователей и разработчиков все необходимые для приложений функции ВИС реализовывались достаточно быстро.

#### 4. Новые элементы виртуальной исследовательской среды

Ставшая уже настоятельной необходимостью разработки мер адаптации к климатическим изменениям требует существенного расширения функциональных возможностей ВИС. В частности, актуальным является обеспечение пользователя возможностью ана-



лиза не включенных в ВИС сторонних наборов данных. Возросшая практическая значимость знания характеристик экстремальных значений требует интеграции в ВИС более мощных методов анализа трендов экстремальных значений, таких как зависящие от времени статистики экстремальных величин [56] и квантильные регрессии [57]. Очень важно и расширение функциональности ВИС на предметные области прикладных задач, выходящих за рамки анализа климатических и метеорологических явлений. Такие задачи решаются в своей предметной области, которой соответствует собственное представление знаний, и используются климатические и метеорологические данные только в качестве входных величин. Для объединения представлений знаний в различных предметных областях и преодоления семантической неоднородности информации, содержащейся в ВИС, и информации пользователя, которую он применяет в своей работе, необходимо использовать онтологическое описание [35]. Только такой подход может привести в конечном счете к созданию интеллектуальных систем поддержки принятия решений в тех предметных областях, где влияние климатических изменений уже является или может стать очень важным. Ниже кратко представлены разрабатываемые элементы ВИС, создание которых существенно расширит ее функциональность.

#### 4.1. Импорт данных в ВИС пользователя

В процессе исследовательской работы у пользователя может возникнуть необходимость в сторонних наборах данных, полученных в результате наблюдений, моделирования или анализа. Для обеспечения полноценного вовлечения ВИС в исследовательский процесс с применением дополнительных данных требуется реализация возможности их загрузки пользователем в ВИС для последующей обработки и визуализации соответствующими встроенными инструментами. Для того чтобы данные пользователя могли быть интегрированы в ВИС, они должны быть представлены в виде файлов в формате netCDF, содержащих двух-, трех- или четырехмерные переменные, зависящие от широты, долготы, вертикального уровня и времени. Двухмерная переменная должна зависеть от широты и долготы; трехмерная — от широты, долготы и вертикального уровня или от широты, долготы и времени; четырехмерная — от широты, долготы, вертикального уровня и времени. Каждый netCDF-файл должен содержать только одну переменную с данными, а также соответствующие размерные переменные, содержащие горизонтальную и вертикальную сетки, и сетку по времени. Допускается разбиение массива данных пользователя на несколько временных диапазонов. В этом случае каждый диапазон записывается в отдельный файл. Все файлы должны иметь одинаковую структуру и одинаковые имена переменных и различаться только сеткой по времени, соответствующей временному диапазону, представленному в каждом файле, а также именем, содержащим начало временного диапазона.

Для импорта данных в ВИС пользователь должен дополнительно предоставить через графический интерфейс мастера импорта следующие метаданные: полный URL источника данных (сайт с описанием данных); название климатического сценария на английском языке (если применимо); горизонтальное разрешение; шаг по времени; охват по времени одним файлом (временной диапазон, представленный в одном netCDF-файле); имя переменной в netCDF-файле; название метеопараметра и единицы его измерения; общее название вертикальных уровней (если применимо); перечень вертикальных уровней в понятной человеку форме (если применимо); соответствующие значения вертикальных уровней, как они записаны в netCDF-переменной (если при-

менимо); единицы измерения вертикальных уровней (если применимо); имя netCDF-переменной, содержащей значения вертикальных уровней (если применимо); начало и конец полного временного диапазона, охваченного массивом данных (если применимо); имя файла или шаблонное имя (в случае разбиения массива на несколько временных отрезков).

#### 4.2. Анализ экстремальных явлений

Хорошо известно, что изменения климата, особенно климатические экстремальные явления, такие как волны жары, холодные периоды, сильные дожди или снегопады, штормы, наводнения или засухи, которые становятся повсеместными [58], в настоящее время оказывают все большее влияние на экономические, политические и социальные процессы [1]. Недавние наблюдения отмечают резкий рост величины и частоты экстремальных климатических явлений и указывают на возрастающий ущерб для экосистем и инфраструктуры от них [59, 60]. Классические подходы многомерной статистики обычно используют наборы данных на сетке и дают информацию о доминирующих совместно меняющихся структурах, но не позволяют явно использовать информацию об экстремальных явлениях. При этом более мощные методы анализа трендов экстремальных значений (зависящие от времени статистики экстремальных величин [56], квантильные регрессии [57]) до сих пор системно не применялись в этой задаче. Относительно составных экстремальных событий (например, температуры и осадков) весьма многообещающим к описанию многомерных функций распределения выглядит копула-подход [61], также еще не применявшийся для решения такой задачи. Реализация в ВИС этих методов значительно повысит ее потенциал и актуальность в сфере исследования изменений климата и их последствий.

Для выделения, анализа и сравнения геопривязанных характеристик экстремальных явлений с использованием методов многомерных статистик экстремальных значений, а также основанных на взвешенных оценках плотности ядра и условной квантильной регрессии на основе пакетов `copula` [61] и `quantreg` [57] на языке R (<https://www.r-project.org/>) были разработаны специализированные программные модули вычислительного блока ВИС. Созданные нами специализированные программные адаптеры на языке Python обеспечивают связь процедур на языках GDL и R посредством специализированного Python-пакета `RPy2` (<https://rpy2.bitbucket.io/>), так как вычислительный блок ВИС, разработанный на языке GDL, не поддерживает вызовы процедур на языке R, но имеет интегрированный с языком Python (<https://www.python.org/>) интерфейс. В дальнейшем планируется выполнить интеграцию разработанных модулей в вычислительный блок ВИС. Более подробное описание новых вычислительных процедур приведено в работе Рязановой [62].

#### 4.3. Слой знаний. OWL-онтологии в ВИС

Создаваемая ВИС опирается на три предметных области: климатические и метеорологические явления на планете, прикладные задачи, использующие климатические и метеорологические величины, и систему поддержки принятия решений, использующую решения прикладных задач. С формальной точки зрения каждой предметной области соответствует, как правило, собственное представление знаний, и корректное

объединение таких представлений можно контролировать с помощью их онтологического описания. Подробное обоснование необходимости перехода от метаданных, характеризующих информационную компоненту геонауки, к онтологическому описанию предметных областей изложено в [35] и обусловлено семантической неоднородностью как представленных в ВИС данных, так и пользовательской информации, применяемой в вычислительной среде. При этом основные трудности у пользователей-новичков [35], не понимающих смысла ключевых слов, состоят как в неграмотном заполнении интерактивных форм, так и в некорректном применении критериев отбора информации. Как отмечено в [35], синтаксические средства, такие как язык GML, или стандартизация интерфейсов (WFS, WMS) улучшают интероперабельность на структурном и синтаксическом, но не семантическом уровне.

Особенность семантической неоднородности состоит в том, что она разделена на “когнитивную неоднородность”, обусловленную разными подходами описания фактов реального мира, приводящими к разным определениям в предметных областях, и “неоднородность наименований” терминов и понятий, при которых одни и те же факты именованы по-разному [35]. В описываемой виртуальной среде проблема семантической неоднородности наиболее заметна при интеграции в нее вычислительных приложений. Такие приложения используются для детализации последствий метеоявлений или климатических изменений, и они необходимы для принятия количественно обоснованных хозяйственных решений. В случае, когда поток работ, определяемый приложениями, использует информацию о разных предметных областях, возникают сложности как у тех пользователей, кто описывает массивы данных с помощью метаданных, так и у тех, кто применяет метеорологические и климатические данные для решения задач.

Для преодоления семантической неоднородности, возникшей при решении прикладных задач, в системе созданы две онтологии: примитивная онтология коллекции метеорологических и климатических данных [40, 41] и понятийная часть онтологии, описывающая метеорологические величины. Примеры онтологий входных и выходных данных двух прикладных задач описаны в наших работах [42, 43].

Созданные онтологии позволяют автоматически согласовывать семантику метеорологических и климатических величин на всех этапах работы системы, за исключением действий, выполняемых в системе поддержки принятия решений (СППР). Формализация СППР является следующим этапом работы и в значительной степени будет обусловлена как прикладными задачами, так и существующими нормами, определяющими те или иные решения руководителей административных органов.

При построении онтологий в данной работе были решены задачи сведения (построения ABox) и формирования понятийной части базы знаний (TBox), необходимые для создания проектируемой системы принятия решений. Получены факты из проанализированных 80 ТБ климатических данных ВИС по 13 коллекциям числовых данных, содержащих 36 наборов данных и 793 числовых массива данных. Эта онтология содержит описание 170 пространственно-временных объектов по 156 физическим величинам. Созданная онтологическая модель климатических данных представляет собой простую и легко расширяемую систему информационных ресурсов, необходимую для дальнейшей работы над проектируемой системой принятия решений. При построении прикладных онтологий использовался язык OWL, что вызвано наличием машин вывода, позволяющих оценить их непротиворечивость, и наличием средств оценки выразительности созданных онтологий. Последнее необходимо для количественного сравнения созданных онтологий с теми, которые возникнут в дальнейшем.

## Заключение

На сегодняшний день не существует общепринятого формализованного описания схемы базы метаданных больших наборов пространственно-привязанных климатических данных, и представленная архитектура является в своем роде первой в мире попыткой решения данной фундаментальной проблемы. Разработанная база метаданных решает три основные задачи:

- 1) содержит информационное наполнение форм графического интерфейса пользователя;
- 2) предоставляет геопорталу информацию, необходимую для формирования корректного файла-задания для вычислительного блока ВИС;
- 3) содержит информацию о структуре и расположении наборов данных, необходимую вычислительному блоку для их чтения и обработки.

Применение этой базы данных систематизирует информацию об имеющихся наборах данных, обеспечивает автоматический поиск файлов данных, способствует повышению масштабируемости и гибкости ВИС.

Разработанный веб-ГИС-клиент основан на архитектуре Boundless / OpenGeo. Его первая версия основана на JavaScript-библиотеках OpenLayers, GeoExt и ExtJS и представляет собой набор программных компонентов, реализующих как общую логику работы приложения, так и независимые элементы графического интерфейса пользователя.

Первое применение разработанной базы метаданных и веб-ГИС-клиента в рамках геопортала показало, что их совместное использование унифицирует и упрощает процедуру расширения архива наборов данных, доступных для анализа, а также добавления новых функциональных модулей их обработки [52].

С помощью разработанного программного обеспечения сформированы фактологическая и понятийная части онтологии коллекций климатических и метеорологических данных, необходимые для построения проектируемой системы поддержки принятия решений.

Из полученных результатов следует, что разрабатываемая ВИС, включая интерактивные инструменты анализа климатических данных, будет полезна как для лиц, ответственных за принятие решений, связанных с оценкой социально-экономических и экологических последствий изменения климата, разработкой стратегий адаптации, выработкой научной политики, так и для профильных специалистов, работающих в областях науки и занимающихся изучением изменений климата. На разработанной основе данные категории пользователей получают корректные оценки климатических характеристик, необходимые для изучения экономических, политических и социальных последствий глобального изменения климата на региональном уровне.

**Благодарности.** Разработка схемы хранения наборов пространственных климатических данных, архитектуры базы метаданных и веб-ГИС-клиента выполнялась при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН IX.138.2; разработка требований к импортируемым данным пользователя, новых программных компонентов анализа экстремальных явлений, примитивной онтологии коллекции метеорологических и климатических данных и понятийной части онтологии, описывающей метеорологические величины, выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-19-10257).

**Список литературы / References**

- [1] Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner (eds). N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- [2] **Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A.** An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Meteorolog. Soc. 2012. Vol. 93. P. 485–498.
- [3] Observing the Earth. Copernicus. Available at: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview3](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3) (accessed 07.02.2018).
- [4] **Ramapriyan, H.K., Behnke, J., Sofinowski, E. et al.** 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 / L. Di, H.K. Ramapriyan (eds). Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 2010. P. 63–92.
- [5] **Kalinichenko, L., Fazliev, A., Gordov, E. et al.** New Data Access Challenges for Data Intensive Research in Russia. Panel: Stimulating survey // Selected Papers of the XVII Intern. Conf. “DAMDID/RCDL 2015” / L. Kalinichenko, S. Starkov (eds). CEUR Workshop Proc., 2015. Vol. 1536. P. 215–237.
- [6] Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий / Е.П. Гордов, В.Н. Лыкосов, В.Н. Крупчатников и др. Новосибирск: Наука, 2013. 199 с.  
Computational and informational technologies for monitoring and modelling of climate change and its consequences / E.P. Gordov, V.N. Lykosov, V.N. Krupchatnikov et al. Novosibirsk: Nauka, 2013. 199 p. (In Russ.)
- [7] The open source standard for Information Management. Big Data Definition. Available at: [http://mike2.openmethodology.org/wiki/Big\\_Data\\_Definition](http://mike2.openmethodology.org/wiki/Big_Data_Definition) (accessed 07.02.2018).
- [8] **Kusnetzky, D.** What is “Big Data?”. Available at: <http://www.zdnet.com/blog/virtualization/what-is-big-data/1708> (accessed 07.02.2018)
- [9] **Vance, A.** Start-Up goes after big data with hadoop helper. New York times blog. Available at: <http://bits.blogs.nytimes.com/2010/04/22/start-up-goes-after-big-data-with-hadoop-helper/> (accessed 07.02.2018).
- [10] **Калиниченко Л.А., Вольнова А.А., Гордов Е.П. и др.** Проблемы доступа к данным в исследованиях с интенсивным использованием данных в России // Информатика и ее применения. 2016. Т. 10, № 1. С. 3–23.  
**Kalinichenko, L.A., Volnova, A.A., Gordov, E.P. et al.** Data access challenges for data intensive research in Russia // Informatics and Application. 2016. Vol. 10, iss. 1. P. 3–23. (In Russ.)
- [11] **Hilbert, M.** Big data for development: A review of promises and challenges. Development policy review. Available at: <http://www.martinhilbert.net> (accessed 07.02.2018).
- [12] **Shekhar, S.** Spatial big data // Proc. AAG-NIH Symp. on Enabling a National Geospatial Cyberinfrastructure for Health Research. Minneapolis, USA, 2012. P. 25. Available at: [http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG\\_NIH\\_July2012\\_GeoFrontiers\\_Shekhar.pdf](http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG_NIH_July2012_GeoFrontiers_Shekhar.pdf) (accessed 07.02.2018).
- [13] **Гордов Е.П., Лыкосов В.Н.** Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для интегрированного исследования окружающей среды Сибири // Вычисл. технологии. 2012. Т. 12, спецвыпуск 2. С. 19–30.

- Gordov, E.P., Lykosov, V.N.** Development of information-computational infrastructure for integrated study of Siberia environment // *Comput. Technologies*. 2007. Vol. 12, special issue 2. P. 19–30. (In Russ.)
- [14] **Nativi, S., Ramamurthy, M., Ritschel, B.** EGU-ESSI position paper. Available at: <http://scert.ru/files/EGU-PositionPaper-final.pdf> (accessed 07.02.2018).
- [15] **Steiniger, S., Hunter, A.J.S.** Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure // *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* / E. Bocher, M. Neteler (eds). Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 2012. P. 247–261.
- [16] **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.  
**Koshkarev, A.V., Ryakhovskiy, V.M., Serebryakov, V.A.** Infrastructure of distributed environment of storage, search and transformation of geospatial data // *Open Education*. 2010. No 5. P. 61–73. (In Russ.)
- [17] **Краснопеев С.М.** Опыт развертывания ключевых элементов инфраструктуры пространственных данных на базе веб-служб // *Матер. XIV Всерос. объединенной конф. “Интернет и современное общество”*. СПб: МПСС, 2011. С. 92–99.  
**Krasnopeev, S.M.** Experience in the implementation of key infrastructure elements based on web services // *Proc. of the XIV Sci. Conf. “Internet and Modern Society”*. S.-Petersburg: MPSS, 2011. P. 92–99. (In Russ.)
- [18] **Кошкарев А.В.** Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // *Пространственные данные*. 2008. № 2. С. 6–14.  
**Koshkarev, A.V.** Geoportal as a tool controlling of spatial data and services // *Spatial Data*. 2008. No. 2. P. 6–14. (In Russ)
- [19] **Якубайлик О.Э.** Геоинформационный интернет-портал // *Вычисл. технологии*. 2007. Т. 12, спецвыпуск 3. С. 116–125.  
**Yakubailik, O.E.** Internet GIS portal // *Comput. Technologies*. 2007. Vol. 12, special issue 3. P. 116–125. (In Russ.)
- [20] **Dragicevic, S., Balram, S., Lewis, J.** The role of Web GIS tools in the environmental modeling and decision-making process // *4th Intern. Conf. on Integrating GIS and Environm. Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs*. Banff, Alberta, Canada, 2000. P. 2–8.
- [21] **Frans, J.M. van der Wel.** Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data // *Meteorological Applications*. 2005. Vol. 12, iss. 1. P. 7–8.
- [22] **Vatsavai, R.R., Burk, T.E., Wilson, B.T., Shekhar, S.** A Web-based browsing and spatial analysis system for regional natural resource analysis and mapping // *Proc. of the 8th ACM Intern. Symp. on Advances in Geographic Inform. Sys.* Washington, D.C., US. 2000. P. 95–101.
- [23] **Шокин Ю.И., Федотов А.М., Жижимов О.Л.** Технологии создания распределенных информационных систем для поддержки научных исследований // *Вычисл. технологии*. 2015. Т. 20, № 5. С. 251–274.  
**Shokin, Yu.I., Fedotov, A.M., Zhizhimov, O.L.** Technologies for designing of distributed information systems to support research // *Comput. Technologies*. 2015. Vol. 20, No. 5. P. 251–274. (In Russ.)

- [24] **Janssen, K.** The availability of spatial and environmental data in the EU. At the crossroads between public and economic interests. Kluwer Law Intern., 2010. 656 p.
- [25] **Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А. и др.** Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды // Вычисл. технологии. 2015. Т. 20, № 5. С. 157–174.  
**Shokin, Yu.I., Dobretsov, N.N., Mamash, E.A. et al.** An information system for acquisition, processing and access to satellite data and its applications in environmental monitoring // Comput. Technologies. 2015. Vol. 20, No. 5. P. 157–174. (In Russ.)
- [26] **Blower, J.D., Gemmell, A.L., Griffiths, G.H. et al.** A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data // Environmental Modelling & Software. 2013. Vol. 47. P. 218–224.
- [27] **Becirspahic, L., Karabegovic, A.** Web portals for visualizing and searching spatial data // Proc. of the 38th Intern. Conf. “Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)”. Opatija, Croatia, 2015. P. 305–311.
- [28] **Gordov, E., Shiklomanov, A., Okladnikov, I., Prusevich, A., Titov, A.** Development of Distributed Research Center for analysis of regional climatic and environmental changes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2016. Vol. 48. P. 012033.
- [29] **Frederick, S., Ramsay, C., Blades, S.C.** Learning Ext JS. Birmingham, UK: Packt Publ., 2008. 299 p.
- [30] **Candela, L., Castelli, D., Pagano, P.** Virtual research environments: An overview and a research agenda // Data Sci. J. 2013. Vol. 12. P. GRDI75–GRDI81.
- [31] **Gordov, E. P., Krupchatnikov, V.N., Okladnikov, I.G., Fazliev, A.Z.** Thematic virtual research environment for analysis, evaluation and prediction of global climate change impacts on the regional environment // Proc. of the 22nd Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. of SPIE, 2016. Vol. 10035. P. 1–10.
- [32] **De Roure, D., Jennings, N.R., Shadbolt, N.R.** The semantic grid: A future e-science infrastructure // Grid Computing: Making the Global Infrastructure a Reality / F. Berman, G. Fox, T. Hey (eds). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. P. 437–470.
- [33] **Li, Yuan-Fang, Kennedy, G., Ngoran, F. et al.** An ontology-centric architecture for extensible scientific data management systems // Future Generation Comput. Sys. 2013. Vol. 29, iss. 2. P. 641–653.
- [34] **Gavrilova, T., Gladkova, M.** Big data structuring: The role of visual models and ontologies // Procedia Comput. Sci. 2014. Vol. 31. P. 336–343.
- [35] **Athanasis, N., Kalabokidis, K., Vaitis, M., Soulakellis, N.** Towards a semantics-based approach in the development of geographic portals // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35, iss. 2. P. 301–308.
- [36] **Brodaric, B., Fox, P., McGuinness, D.L.** Geoscience knowledge representation in cyberinfrastructure // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35, iss. 4. P. 697–699.
- [37] **Reitsma, F., Laxton, J., Ballard, S. et al.** Semantics, ontologies and eScience for the geosciences // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35, iss. 4. P. 706–709.
- [38] **DiGiuseppe, N., Pouchard, L.C., Noy, N.F.** SWEET ontology coverage for earth system sciences // Earth Sci. Inform. 2014. Vol. 7, iss. 4. P. 249–264.
- [39] **Li, W., Yang, C., Nebert, D., Raskin, R. et al.** Semantic-based web service discovery and chaining for building an Arctic spatial data infrastructure // Computers & Geosciences. 2011. Vol. 37, iss. 11. P. 1752–1762.

- [40] **Барт А.А., Привезенцев А.И., Фазлиев А.З.** Онтологическое описание коллекции климатических данных для системы поддержки принятия решений // Матер. Всерос. конф. с междунар. участием “Знания — Онтологии — Теории” (ЗОНТ). Новосибирск: “Дигит Про”, 2017. Т. 1. С. 47–53.  
**Bart, A.A., Privezentsev, A.I., Fazliev, A.Z.** Ontological description of climate data collections for the decision support system // Proc. of the Russ. Conf. “Knowledge — Ontology — Theory” (ZONT). Novosibirsk: “Digit Pro” press, 2017. Vol. 1. P. 47–53. (In Russ.)
- [41] **Gordov, E.P., Okladnikov, I.G., Titov, A.G., Fazliev, A.Z.** Some aspects of development of virtual research environment for analysis of climate change consequences // Selected Papers of the XVIII Intern. Conf. “DAMDID/RCDL 2016” / L. Kalinichenko, Y. Manolopoulos, S. Kuznetsov (eds). CEUR Workshop Proc., 2016. Vol. 1752. P. 195–201.
- [42] **Bart, A., Churuksaeva, V., Fazliev, A. et al.** Ontological description of meteorological and climate data collections // Selected Papers of the XIX Intern. Conf. “DAMDID/RCDL 2017” / L. Kalinichenko, Y. Manolopoulos, N. Skvortsov, V. Sukhomlin (eds). CEUR Workshop Proc., 2017. Vol. 2022. P. 266–272.
- [43] **Alipova, K.A., Bart, A.A., Fazliev, A.Z. et al.** Systematization of climate data in the virtual research environment on the basis of ontology approach // Proc. of the 23th Intern. Symp. on Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. Proc. of SPIE, 2017. Vol. 10466. P. 1–11.
- [44] **Santokhee, A., Blower, J., Haines, K.** Storing and manipulating gridded data in spatial databases // Reading E-science Center, Univ. of Reading. Available at: [http://go-essp.gfdl.noaa.gov/presentations/06\\_06\\_05/Santokhee/Adit\\_Sank.ppt%20%5BRead-Only%5D.pdf](http://go-essp.gfdl.noaa.gov/presentations/06_06_05/Santokhee/Adit_Sank.ppt%20%5BRead-Only%5D.pdf) (accessed 08.02.2018).
- [45] **Okladnikov, I.G., Gordov, E.P., Titov, A.G.** Development of climate data storage and processing model // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2016. Vol. 48. P. 012030.
- [46] **Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г.** Разработка Веб-ГИС на основе сервисов обработки и визуализации пространственных данных для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений // Информ. и матем. технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 96–109.  
**Titov, A.G., Gordov, E.P., Okladnikov, I.G.** Development of web GIS on the basis of spatial data processing and visualization services for analysis and forecasting of regional climate change // Inform. i Matem. Tekhnol. v Nauke i Upravlenii. 2016. No. 4-2. P. 96–109. (In Russ.)
- [47] **Storch, H. von, Zwiers, F.W.** Statistical analysis in climate research. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1999. 484 p.
- [48] **Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я.** Климатологическая обработка метеорологических наблюдений. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 295 с.  
**Kobysheva, N.V., Narovlyanskiy, G.Ya.** Climatological processing of meteorological observations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 295 p. (In Russ.)
- [49] **Sillmann, J., Roeckner, E.** Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change // Climate Change. 2008. Vol. 86. P. 83–104.
- [50] **Shulgina, T.M., Genina, E.Yu., Gordov, E.P.** Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // Environ. Res. Lett. 2011. Vol. 6, No. 4. P. 045210.
- [51] **Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. и др.** 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.  
**Gordov, E.P., Okladnikov, I.G., Titov, A.G. et al.** Geo-information system for investigation of regional climatic changes and first results obtained // Atmosphere and Ocean Optics. 2012. Vol. 25, No. 2. P. 137–143. (In Russ.)



- [52] **Riazanova, A.A., Voropay, N.N., Okladnikov, I.G., Gordov, E.P.** Development of computational module of regional aridity for web-GIS “Climate” // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2016. Vol. 48. P. 012032.
- [53] **Ryazanova, A.A., Voropay, N.N.** Droughts and excessive moisture events in southern Siberia in the Late XXth—Early XXIst centuries // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2017. Vol. 96. P. 012015.
- [54] **Гордова Ю.Е., Генина Е.Ю., Горбатенко В.П. и др.** Поддержка образовательного процесса в области современной климатологии на основе веб-ГИС платформы “Климат” // Открытое и дистанц. образование. 2013. № 1. С. 14–19.  
**Gordova, Yu.E., Genina, E.Yu., Gorbatenko, V.P. et al.** Support of the educational process in modern climatology within the web-GIS platform “Climate” // Open and Distance Education. 2013. No. 1. P. 14–19. (In Russ.)
- [55] **Гордова Ю.Е., Мартынова Ю.В., Шульгина Т.М.** Использование вычислительно-информационной веб-ГИС для развития у студентов-климатологов навыков моделирования и мониторинга климатических изменений // Изв. Иркутского гос. ун-та. Науки о Земле. 2014. Т. 9. С. 55–68.  
**Gordova, Yu.E., Martynova, Yu.V., Shulgina, T.M.** Use of the computational-informational web-GIS system for the development of climatology students’ skills in modeling and monitoring of climate change // The Bulletin of Irkutsk State Univ. Series: Earth Sciences. 2014. Vol. 9. P. 55–68. (In Russ.)
- [56] **Rust, H.W.** The effect of long-range dependence on modelling extremes with the generalised extreme value distribution // Europ. Phys. J. Spec. Top. 2009. Vol. 174. P. 91–97.
- [57] **Barbosa, S.M., Scotto, M.G., Alonso, A.M.** Summarizing changes in air temperature over Central Europe by quantile regression and clustering // Natural Hazards in Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 11. P. 3227–3233.
- [58] **Parmesan, C., Root, T.L., Willig, M.R.** Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2000. Vol. 81, No. 3. P. 443–450.
- [59] IPCC, 2012: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the intergovernmental panel on climate change / C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker et al. (eds). Cambridge, UK and New York, N.Y., USA: Cambridge Univ. Press, 2012. 582 p.
- [60] **Sillmann, J., Donat, M.G., Fyfe, J.C., Zwiers, F.W.** Observed and simulated temperature extremes during the recent warming hiatus // Environ. Res. Lett. 2014. Vol. 9, No. 6. P. 064023.
- [61] **Schölzel, C., Friederichs, P.** Multivariate non-normally distributed random variables in climate research — introduction to the copula approach // Nonlinear Processes in Geophys. 2008. Vol. 15, iss. 5. P. 761–772.
- [62] **Ryazanova, A.A., Okladnikov, I.G., Gordov, E.P.** Integration of modern statistical tools for the analysis of climate extremes into the web-GIS “CLIMATE” // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2017. Vol. 96. P. 0012014.

*Поступила в редакцию 16 февраля 2018 г.,  
с доработки — 9 апреля 2018 г.*

**Development of elements of a virtual research environment for the analysis, assessment and prediction of the consequences of global climate change**

GORDOV, EVGENY P.<sup>1,2,3,\*</sup>, OKLADNIKOV, IGOR G.<sup>1,2,3</sup>,  
TITOV, ALEXANDER G.<sup>1,2,3</sup>, FAZLIEV, ALEXANDER Z.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>3</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

\*Corresponding author: Gordov, Evgeny P., e-mail: [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru)

Intermediate results of the project aimed at improving methods of the detailed analysis, assessment and prediction of global climate change impact on the regional environment and climate are presented. New reliable interactive tools for in-depth statistical analysis and studying climate change impact obtained in this project will provide specialists, professionals, decision-makers and stakeholders with detailed climatic information. The project addresses the development of a topical virtual research environment (VRE) for the comprehensive study of ongoing and possible future climate change. It analyses the relevant subsequent effects. Such VRE will provide full topical informational required for studying regional economic, political and social consequences of the global climate change. The ultimate goal of this work is a design of hardware and software prototype supporting the topical virtual research environment for climate and environmental monitoring and analysis of the impact of climate change on socio-economic processes on both local and regional scales. This VRE will integrate both already known and new archives of climate data sets with software realizations of traditional and advanced methods for statistical analysis of big spatial data sets.

VRE prototype will provide scientists, decision-makers and stakeholders the access to processing resources and services for interactive analysis of geographically distributed spatial data through a web browser. It will present the results of the analysis using geoinformation technologies and ensure the systematization of spatial data and associated climate information. Also, the work describes an ontological approach to this systematization, which makes it possible to compare the semantics of meteorological and climatic parameters used in different collections and applied problems.

*Keywords:* virtual research environment, big environmental datasets, climate change.

**Acknowledgements.** Development of a scheme for storing spatial climate data sets, the metadata database architecture and the client's web GIS was financially supported by the fundamental research program of SB RAS IX.138.2; the development of requirements for imported user data, new software components for the analysis of extreme events, primitive ontology of the collection of meteorological and climatic data, and the conceptual part of the ontology describing meteorological quantities was financially supported by the RSF (grant No. 16-19-10257).

*Received 16 February 2018*

*Received in revised form 9 April 2018*