

УДК 004.9:551.501.45+524.3+551.583

## Геоинформационная веб-система для исследования региональных природно-климатических изменений и первые результаты ее использования

Е.П. Гордов<sup>1,2</sup>, И.Г. Окладников<sup>1,2</sup>, А.Г. Титов<sup>1,2</sup>, В.Ю. Богомолов<sup>1</sup>,  
Т.М. Шульгина<sup>1</sup>, Е.Ю. Генина<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634021, Томск, пр. Академический, 10/3

<sup>2</sup>Томский филиал Института вычислительной математики СО РАН  
634021, Томск, пр. Академический, 4

Поступила в редакцию 17.10.2011 г.

Описана информационно-вычислительная система для статистической обработки и анализа архивов пространственно-привязанных геофизических данных, полученных в результате наблюдений и моделирования. Функциональные возможности разработанной системы включают в себя выбор территории и характеристик для анализа, обработки и визуализации результатов. В качестве одного из приложений системы были реализованы программные модули для анализа региональных особенностей динамики основных климатических характеристик и их взаимосвязей, а также для обеспечения графического представления результатов в виде графиков, диаграмм и полей на карте соответствующей территории с использованием веб-ГИС-технологий.

Эффективность использования информационно-вычислительной системы проиллюстрирована на примере изучения пространственно-временного поведения современной приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири в терминах следующих климатических характеристик: годовой и сезонный ход метеорологических величин, продолжительность вегетационного периода и сумма среднесуточных значений температуры выше 5 °С, а также сумма и интенсивность осадков.

*Ключевые слова:* информационно-вычислительная система, веб-технологии, пространственно-привязанные данные, ГИС, изменения климата; information-computational system, web-technologies, spatially-referenced data, GIS, climate change.

### Введение

Наборы пространственно-привязанных геофизических данных (базы метеорологических и географических данных, результатов моделирования и реанализа, спутниковых снимков и др.) активно используются при прогнозе, моделировании и интерпретации климатических и экосистемных изменений на разных пространственных и временных масштабах. К таким наборам относятся, прежде всего, ряды многолетних систематических наблюдений метеорологических величин, получаемых сетью метеорологических станций, а также архивы геофизических данных, полученные с помощью глобальных метеорологических и климатических моделей.

Наборы данных, полученные различными научными организациями, зачастую отличаются составом, форматом и внутренней структурой, что не только затрудняет обмен ими, но и усложняет возможность

их взаимного сравнения, при этом существенно уменьшает достоверность выполненного на их основе анализа. Кроме того, из-за растущих объемов данных моделирования и наблюдений (особенно спутниковых), составляющих в настоящее время десятки—сотни терабайт для одного набора данных, уже сейчас возникают большие сложности при их комплексном анализе. Возможное решение в данной ситуации — это создание основанной на современных информационно-телекоммуникационных технологиях программной инфраструктуры для комплексного использования наборов пространственно-привязанных геофизических данных [1].

Современные технологии позволяют интегрировать различные технологические решения для организации таких информационных ресурсов. Для решения этой задачи был выбран основанный на комбинированном использовании потенциала веб- и ГИС-технологий подход, нацеленный на создание прикладной информационно-вычислительной веб-системы, обладающей функциональностью ГИС.

На сегодняшний день уже существует несколько информационных веб-систем, посвященных в той или иной мере обработке пространственно-привязанных геофизических данных. Это система GIOVANNI

\* Евгений Петрович Гордов (gordov@scert.ru); Игорь Георгиевич Окладников (oig@scert.ru); Александр Георгиевич Титов (titov@scert.ru); Василий Юрьевич Богомолов (bogomolov@scert.ru); Тамара Михайловна Шульгина (stm@scert.ru); Елена Юрьевна Генина (genina@scert.ru).

(<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni/>), созданная NASA для распространения результатов дистанционного зондирования Земли, а также система RIMS (An Integrated Mapping and Analysis System with Application to Siberia, <http://RIMS.unh.edu/>), созданная в университете Нью Гемпшира и направленная, в первую очередь, на анализ гидрологических процессов.

Разработанная в Институте вычислительной математики РАН система нацелена на распространение и визуализацию данных климатического моделирования (<http://ksv.inm.ras.ru>). Функциональные возможности системы KNMI «Climate explorer» (<http://climexp.knmi.nl/>) включают отображение временных последовательностей данных в виде 2-мерных графиков, визуализацию полей данных, расчет средних и экстремальных значений, а также стандартного отклонения и корреляции с другими параметрами.

Можно также упомянуть разрабатываемую в настоящее время в Институте вычислительных технологий СО РАН модель распределенной информационно-аналитической системы для поиска, обработки и анализа пространственно-распределенных данных [2, 3], основанную на комбинации ГИС и веб-технологий. Однако несмотря на ряд сделанных попыток, в области оценки климатических и экосистемных изменений в Сибири по-прежнему нет мощного инструмента, обладающего унифицированным веб-интерфейсом и объединяющего доступные в настоящее время возможности по обработке, анализу и визуализации разнородных наборов данных.

## Архитектура

Информационно-вычислительная веб-система состоит из четырех основных частей (рис. 1, цветная вклейка):

1. Структурированные архивы пространственно-привязанных геофизических данных, снабженные соответствующими метаданными.

2. Вычислительное ядро, представляющее собой набор независимых модулей, реализованных на языке IDL (Interactive data language, <http://www.ittvis.com/ProductServices/IDL.aspx>).

3. Веб-портал, реализующий логику веб-приложений, связь с картографическими веб-сервисами и обеспечивающий работу с хранилищем метаданных.

4. Графический интерфейс пользователя.

В рамках разработки проводятся сбор, автоматизированная систематизация и преобразование к форматам NetCDF/HDF5 доступных в Интернете метеорологических данных и данных дистанционного зондирования, с последующим их размещением в связанном с высокопроизводительным сервером хранилище данных. Для выбранных регионов, в частности для Западной Сибири, на основе архивов данных метеорологических наблюдений и полей метеопараметров низкого пространственного разрешения (реанализов) с помощью статистических методов и современных вычислительных моделей восстанавливаются поля метеорологических величин с высоким пространственным разрешением.

Специализированный веб-портал является связующим звеном между конечным пользователем и системой, а также между ее элементами. В нем реализована необходимая базовая функциональность, такая как авторизация пользователей, подключение к базам данных, использование HTML-шаблонов, языковая локализация, система управления контентом (CMS) и ряд других возможностей. Разработка графического интерфейса производится с использованием языков DHTML, PHP и JavaScript. Библиотека для проектирования элементов интерфейса основана на инструментарии GeoExt (<http://www.geoext.org/>), объединяющем JavaScript-библиотеки ExtJS Framework (<http://extjs.com/>) и OpenLayers (<http://openlayers.org>). ПО GeoServer (<http://geoserver.org/display/GEOS/What+is+GeoServer>) используется для реализации функциональности ГИС и позволяет отображать картографические материалы, представленные в различных форматах и расположенные на различных серверах.

Пользователь системы взаимодействует с интернет-порталом с помощью имеющегося на любой современной рабочей станции веб-браузера. Графический интерфейс для администрирования и эксплуатации информационно-вычислительной системы предоставляет пользователю возможность в простой и интуитивно понятной форме задать пространственные границы интересующей области, выбрать соответствующие геофизические характеристики, временной интервал, а также последовательность математической и/или статистической обработки каждой переменной, с указанием параметров графического или файлового вывода результата на каждом этапе обработки.

На основе этих параметров веб-порталом формируется и передается менеджеру вычислительного ядра задача на обработку и визуализацию данных. Менеджер ядра производит анализ задачи, подготавливает расчетный конвейер и производит запуск соответствующих расчетных модулей. Каждый расчетный модуль имеет доступ к архивам данных через специальную библиотеку, обеспечивающую поиск, чтение и выборку данных из архивов, а также предоставляющую специализированный интерфейс программирования приложений (API) для модулей пользователя.

В настоящее время функциональность, представленная ранее в прототипе информационно-вычислительной системы [4], значительно расширена. Она включает: расчет средних и экстремальных значений, стандартного отклонения, а также подсчет числа дней, для которых значение параметра лежит в заданном диапазоне, вычисление коэффициентов корреляции и линейной регрессии, расчет трендов и индексов изменения климата [5]. По окончании расчетов производится визуализация полученных результатов в виде графических полей с цветовой дифференциацией по величине в каждой пространственной точке, контурных полей, векторных полей, или 2-мерных графиков с соответствующими легендами. Результаты записываются в файлы в формате GeoTIFF и передаются в веб-портал для отображения

в графическом интерфейсе пользователя. Кроме того, результаты расчетов предоставляются пользователю в виде растровых файлов формата EPS или GeoTIFF или векторных ESRI (Environmental Systems Research Institute) shape-файлов (<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>), в зависимости от типа результата. Результаты могут быть предоставлены также в формате NetCDF или в виде универсального XML-представления, для обеспечения интероперабельности.

Сопроводительный файл с метаданными удовлетворяет XML стандартам представления географической информации и метаданных, в частности ISO19115 и ГОСТ Р 52573-2006. Для обеспечения совместимости со стандартами технологии Semantic Web, в том числе необходимой для автоматической обработки результатов семантической интероперабельности, метаданные также предоставляются в формате RDF (<http://www.w3.org/RDF/>). Соответствующая RDF-схема [6] создана на основе упомянутых выше стандартов метаданных и таких XML-стандартов, как Дублинское Ядро (<http://dublincore.org/>), Directory Interchange Format (<http://gcmd.gsfc.nasa.gov/User/difguide/difman.html>) и Ecological Metadata Language (<http://knb.ecoinformatics.org/software/eml/>).

## Используемые наборы данных

В настоящее время для использования в системе доступны следующие архивы пространственно распределенных данных: первая и вторая редакция реанализа NCEP/NCAR [7, 8], реанализ JRA-25 JMA/CRIEPI [9], реанализы ECMWF ERA-40 [10] и ERA Interim [11], данные проекта «Азиатские осадки – Интеграция данных наблюдений высокого разрешения для оценки водных ресурсов» APHRODITE [12], а также Глобальный реанализ XX столетия NOAA/CIRES [13]. Кроме того, в хранилище данных имеются архивы спутниковых данных Landsat 4–7, Global Land Survey (GLS), MODIS, а также данные наблюдений метеостанций России.

Следует заметить, что до недавнего времени пространственное разрешение полей метеохарактеристик, полученных в ходе выполнения проектов по реанализу, не превышало 1°, что совершенно недостаточно для региональных приложений. Только в последнее время появились новые проекты, в ходе которых вычисляются поля с более высоким разрешением [14]. Хотя при реализации этих проектов используются новые метеорологические модели и системы усвоения, набор наблюдений, используемых для усвоения, остается тем же, что и в реанализах низкого разрешения.

Чтобы дать исследователям возможность детального анализа процессов локального и регионального масштаба, архив должен быть пополнен полями метеовеличин с высоким пространственным разрешением, при построении которых учитываются измерения, выполненные на метеостанциях региона. Для решения этой задачи используются мезомасштабные модели прогноза погоды [15, 16].

Такой подход выгодно отличается от обычных схем интерполяции и статистического «даунскейлинга», так как использование физически обоснованных прогностических моделей и системы усвоения данных стационарных измерений позволяет повысить достоверность получаемых полей. Однако при этом появляется ряд серьезных проблем, к которым относятся выбор начальных и граничных условий, временные ограничения на работу прогностических моделей, чувствительность моделей прогноза погоды к долгосрочному запуску. Эти проблемы были решены в процессе получения метеорологических полей высокого разрешения для территории Западной Сибири.

В качестве кандидатов на формирование граничных условий для региональной модели рассматривались NCEP/DOE AMIP II, JRA-25 и реанализ ERA-40. В результате сравнения с данными наблюдений на метеостанциях за одинаковый временной интервал был выбран набор данных реанализа ECMWF ERA-40 как наиболее точно воспроизводящий метеорологические характеристики для территории Западной Сибири. Ввиду отсутствия в этом архиве необходимой для работы модели температуры поверхности, использовалась часть данных из ECMWF ERA-40 Interim, являющегося современной версией ECMWF ERA-40. На этой основе были сформированы соответствующие входные данные для препроцессорной системы модели.

Для получения непрерывных полей прогноза, частичного учета специфики климата региона и усвоения данных использовалась WRF ARW система версии 3.1.1 [17, 18]. Ее основой является численная модель прогноза погоды и метеорологического исследования WRF. WRF ARW состоит из WPS – системы подготовки данных, численного ядра WRF и численного пакета для реализации физических схем. Препроцессорная система (WPS) позволяет формировать входные данные для модели из исходных метеополей, отвечающих определенной структуре и формату, а также готовит входные данные для модели (подстилающая поверхность, топографическая составляющая и т.д.).

Численное ядро ARW-системы включает в себя [18]: ядро (математические модули), физические схемы для приземного слоя, модель радиации, схемы микрофизики, модели накопления осадков и схемы параметризации облачности. В настоящее время эта модель активно используется для проведения атмосферных исследований, получения прогноза погоды, исследования регионального климата, глобального моделирования <http://forum.wrfforum.com/>.

Модель WRF была настроена для расчета на мелкомасштабной сетке для северных регионов Азии, в частности Западной Сибири. Для этого региона были подобраны соответствующие параметризации:

- для микрофизики (атмосферы): схема Томсона [19] – модель снега, льда, облаков и дождя;
- для длинноволнового излучения: схема RRTM – основана на схеме Mlawer [20], является спектральной схемой, использующей метод К-корреляции. Также она использует предварительный набор таблиц

входных данных для точного представления длинноволновых процессов за счет водяного пара, озона, CO<sub>2</sub> и газовых примесей (если они присутствуют), а также учитывает оптическую толщину облаков;

– для коротковолнового излучения: схема Годдарта [21] – двухпоточная многодиапазонная схема с эффектом облаков;

– для диффузии: схема горизонтальной диффузии 6-го порядка;

– для поверхностного слоя: схема ETA – на основе схемы тепловой длины шероховатости Монина–Обухова и Зилитинкевича со стандартной функцией параметризации, зависящей от входных данных;

– для модели подстилающей поверхности: Noah LSM (NCEP/NCAR/AFWA) – 4-уровневая модель влажности и температуры почвы с расчетом энергетических потоков, модель влажности растительности и модель динамики снега.

Достоверность получаемых прогнозов проверялась сравнением с имеющимися данными станционных измерений. В частности, сравнение дневного хода температуры на высоте 2 м, полученного на основе данных измерений мобильной станции на Бакчарском болоте, и результатов моделирования показало их хорошее согласие.

Существенными для выполнения расчетов являются усвоение данных измерений и процесс конвертирования этих данных в нужные форматы. Для этой цели используется метод «observation nudging». Этот метод эффективно управляет ростом ошибки модели, в то же время позволяя модели генерировать мезомасштабные структуры с такой степенью детализации, которая не может быть достигнута только на основе данных наблюдений. В результате получается более точное, чем полученное без учета данных наблюдений, решение.

После дополнительного исследования в препроцессорную систему WPS была подключена карта USGS LULC с пространственным разрешением 9,925 км, включающая в себя 20 типов землепользования. Данная карта достаточно хорошо отображает многообразие этих типов, характерное для Сибирского региона, в частности для территории Западной Сибири. Для приземных данных (индекс шероховатости, температура почвы, альbedo) были использованы данные NCEP с таким же пространственным масштабом.

Результатом работы созданного программного комплекса являются поля метеорологических величин, которые в определенном смысле есть проекции полей реанализа на сетку с высоким пространственным шагом (20 км), «подтянутых» к данным измерений наземных станций. На рис. 2 (вклейка) приведены поля приземных температур и изолинии давления на уровне моря на территории Западной Сибири, построенные по данным реанализа ERA-40 (рис. 2, а) и результатам моделирования с пространственным разрешением 20 км (рис. 2, б).

Видно, что рис. 2, б разрешает ранее сглаженные структуры и результаты моделирования позволяют анализировать изменения полей метеохарак-

теристик с конкретной географической привязкой к особенностям поверхности и растительных экосистем на ней. Это открывает возможность для выявления вкладов той или иной экосистемы в пространственно-временную неоднородность метеополей. Кроме того, появляется возможность использования полных архивов региональных метеополей в качестве входных и начальных данных для региональных климатических моделей.

В настоящее время архив пополняется полями климатических характеристик для Западной Сибири за 1990–2000 гг. Расчетной областью является Западно-Сибирская равнина (2500 × 2000 км). Пространственное разрешение полей 20 км (во вложенных областях 10 км). На следующем этапе временной интервал моделирования будет расширен с 1960 по 2010 г.

## Функциональность системы

Реализованные в системе методы статистической обработки пространственно-привязанных данных описаны в работах [22–24]. В первую очередь они направлены на оценку особенностей динамики и взаимосвязей основных метеорологических характеристик и их анализ. Подготовлен базовый набор геопривязанных карт, включая карты растительного покрова, природных экосистем, индекса NDVI, для их последующего использования в веб-ГИС-сервисе.

В системе реализована следующая функциональность для работы с метаданными: добавление/редактирование RDF-метаданных, поиск по авторам метаданных и по исследователям, входящим в соответствующий проект, семантический поиск по ключевым словам [25]. Это делает систему готовой к интеграции в создаваемую сообществом инфраструктуру пространственных данных [26].

На основе выработанной архитектуры информационно-вычислительной веб-системы разработана программная библиотека, обеспечивающая вычислительным модулям доступ к подготовленным наборам данных. Реализован менеджер задач вычислительного ядра, создан набор из 20 вычислительных модулей для расчета базовой статистики и индексов изменения климата [5]. Кроме того, разработан графический модуль ядра, обеспечивающий визуализацию результатов обработки и запись их в файлы формата Encapsulated Postscript, GeoTIFF и ESRI Shapefile, а также предоставление конечному пользователю картографических легенд по соответствующему WMS-запросу. В качестве технологической базы для представления картографической информации в Интернет используется ПО GeoServer (<http://geoserver.org/display/GEOS/What+is+Geo+Server>), соответствующее стандартам OpenGIS (<http://www.opengeospatial.org/standards>). Произведена интеграция базовой ГИС-функциональности с ПО веб-портала, а также реализовано совместное представление графических результатов вычислений и карт Google Maps (Google Maps API. <http://code.google.com/intl/ru/apis/maps/>).

## Исследование динамики климатических характеристик на территории Сибири

Созданная веб-ГИС-система является универсальным инструментом анализа региональных климатических и экологических изменений, не требующим от пользователя знания современных языков программирования и в то же время обеспечивающим достоверное решение задач с использованием разнородных архивов геофизических данных. В качестве примера потенциала системы приведем некоторые, полученные с ее помощью, результаты анализа современных климатических изменений на территории Сибири и их возможного влияния на развитие растительности региона.

Результаты исследований отклика современного климата Сибири на глобальные изменения достаточно широко освещены в литературе, см., например, [27–29]. Однако большинство оценок колебаний метеорологических величин на территории региона проводилось с точки зрения изменения их климатических средних [28], а изменение времени наступления некоторых метеорологических явлений [28, 30] практически не рассматривалось. Кроме того, в этих работах не уделялось должного внимания анализу адекватности данных используемых реанализов полученным на метеостанциях наблюдениям. Применение комплекса программ геоинформационной веб-системы, обеспечивающего использование необходимых методов обработки на основе предварительно подобранной достоверной метеорологической информации, позволяет получить наиболее полное и адекватное описание происходящих в Сибири климатических изменений.

В рамках данного исследования изучались поведение приземной температуры воздуха и количество осадков на территории Сибири в терминах следующих климатических характеристик: годовой и сезонный ход метеорологических величин, продолжительность вегетационного периода и сумма среднесуточных значений температуры выше  $5^{\circ}\text{C}$ , а также сумма и интенсивность осадков. Временная динамика климатических характеристик оценивалась по линейным трендам, статистическая значимость которых определялась по критерию Стьюдента [31]. Источником данных послужили архивы ECMWF ERA INTERIM Reanalysis для описания приземной температуры воздуха и APHRODITE JMA – для количества осадков за период с 1991 по 2007 г. Выбор данных обусловлен их наилучшей согласованностью с рядами инструментальных наблюдений [32] метеорологических величин, которая была выявлена в результате сравнительного анализа данных разных реанализов и натурных измерений.

### Динамика приземной температуры воздуха

Пространственно-временная динамика приземной температуры воздуха над территорией Сибири

характеризуется линейными трендами, рассчитанными для средних годовых, сезонных и месячных температур.

Выполненный нами анализ изменений годовой приземной температуры в Сибири уточняет обнаруженную ранее [29] пространственно-временную неоднородность этих изменений с очагами роста температур в Западной Сибири ( $0,8–1,6^{\circ}\text{C}/10$  лет) и районами понижения температур в центральной части Восточной Сибири ( $-0,2 \dots -0,5^{\circ}\text{C}/10$  лет). Анализ показал, что происходящие изменения годовых температур напрямую зависят от вклада сезонных колебаний температур зимы и лета. В частности, изменения термического режима зимнего сезона выражены очагами потепления в северных и южных районах Западной Сибири, сформированными за счет положительных температур декабря.

На территории Восточной Сибири выявлены участки с отрицательными значениями трендов ( $-0,8 \dots -1,6^{\circ}\text{C}/10$  лет), образовавшиеся в результате понижения температур ( $-0,5 \dots 2,5^{\circ}\text{C}/10$  лет) декабря и января. Летний сезон, в свою очередь, отмечен существенными темпами понижения температур до  $-1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет в центральном и южном регионах Сибири, которые являются результатом ярко выраженных температурных колебаний июня. При этом повышение температуры на  $0,6–1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет наблюдается в северных районах Сибири. Динамика температур весеннего и осеннего сезонов нашла отклик в колебаниях продолжительности вегетационного периода года (рис. 3, вклейка) и суммы эффективных температур (рис. 4, вклейка).

Анализ температур показал ее рост в апреле (до  $1,5^{\circ}\text{C}/10$  лет) на территории Восточной Сибири и в мае ( $0,4–0,9^{\circ}\text{C}/10$  лет) на территории Западной Сибири. Также потепление в Западной Сибири наблюдается осенью в среднем на  $2,4^{\circ}\text{C}/10$  лет, в то время как в центральной части Восточной Сибири прослеживается тенденция к похолоданию ( $-1,8^{\circ}\text{C}/10$  лет).

На севере территории Сибири число теплых дней со среднесуточной температурой выше  $5^{\circ}\text{C}$  увеличилось до 15 каждые 10 лет (см. рис. 3). Сумма эффективных температур ( $SDDT_j = \sum_{i=1}^I \Delta T_{ij}$ ,  $\Delta T_{ij} = T_{ij} - 5$ , где  $T_{ij}$  – среднесуточная температура дня  $i$  периода  $j$ , а  $I$  – количество дней, когда  $T_{ij}$  превысило  $5^{\circ}\text{C}$ ) составляет в среднем  $40–70^{\circ}\text{C}/10$  лет (см. рис. 4).

Следует отметить, что при температуре больше  $5^{\circ}\text{C}$  начинаются процессы роста и жизнедеятельности [33] растений, поэтому анализ распределения климатических параметров этого периода представляет большой интерес при изучении взаимодействия климата и растительности.

### Динамика количества осадков на территории Сибири

Анализ количества осадков, проведенный отдельно для холодного и теплого сезонов на территории

Сибири, не показал их явных изменений. В динамике осадков зимнего сезона можно отметить их уменьшение в северных районах Западной Сибири, где тренд достигает 40 мм/10 лет, преимущественно за счет уменьшения количества осадков января и февраля. Анализ динамики осадков летнего сезона также выявил отрицательный тренд на территории Западной Сибири, достигающий –90 мм/10 лет. Изучение динамики количества осадков по месяцам выявило их увеличение в июне на территории Восточной Сибири, преимущественно в южной и юго-восточной ее частях, до 18–37 мм/10 лет. Также существенное увеличение осадков наблюдается в июле в Восточной Сибири (45 мм/10 лет), но на территории Западной Сибири происходит заметное уменьшение их количества (–70 мм/10 лет). Август не отмечен явными изменениями в динамике осадков, что уменьшает его вклад в сезонные колебания. Интенсивность количества осадков и количество дней с осадками выше заданного порогового значения (1, 10 и 20 мм) не имеют статистически значимых изменений на территории Сибири.

Меняющиеся характеристики гидротермического режима Сибири уже находят отклик в динамике биологических процессов, в частности в изменении растительного покрова региона [34, 35]. Рост продолжительности вегетационного периода, суммы эффективных температур в пределах вегетационного периода года и суммы осадков приводит к росту продуктивности растительности на юге Западной Сибири (55–60° с.ш., 59–84° в.д.).

### Заключение

Представленная система дает основу для интеграции междисциплинарных (географических, климатических, метеорологических) исследований регионального отклика на глобальные изменения климата. В ней пользователю доступны для анализа архивы данных полевых наблюдений, моделирования и данных дистанционного зондирования. Работа с разнородными пространственно-привязанными данными поддерживается созданным универсальным программным инструментарием, интегрированным в комплексную информационно-вычислительную систему, обладающую ГИС-функциональностью. Эта система является следующим шагом в процессе разработки прикладных информационно-телекоммуникационных систем, предоставляющих специалистам различных областей науки уникальные возможности надежного анализа разнородных геофизических данных.

Использование апробированных вычислительных алгоритмов обеспечивает достоверность получаемых в конкретных предметных областях результатов. Доступность системы в Интернете и возможность работы с данными без использования специальных знаний в программировании должны позволить широкому кругу ученых освободиться от выполнения рутинных работ и сконцентрироваться на решении чисто научных задач.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (контракт

№ 07.514.11.4044), проектов РФФИ № 11-05-01190а и 10-07-00547а, проектов Программы фундаментальных исследований СО РАН 4.31.1.5 и 4.31.2.7, а также интеграционных проектов СО РАН № 4, 8, 9, 50 и 66.

1. 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. V. 40. ISBN: 978-90-481-8640-2. Balzter, Heiko (Ed.) 1st Edition. 2010. 300 p.
2. Шокин Ю.И., Жижимов О.Л., Пестунов И.А., Сивяевский Ю.Н., Смирнов В.В. Распределенная информационно-аналитическая система для поиска, обработки и анализа пространственных данных // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. Специальный выпуск № 3. С. 108–115.
3. Добрецов Н.Н., Потатуркин О.И., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. О проекте распределенной информационно-вычислительной системы сбора, хранения и обработки данных дистанционного зондирования Земли для регионов Сибири и Дальнего Востока // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13; Вестник КазНУ. № 3. Часть 1. Совместный выпуск по материалам Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». 10–14 сентября, 2008.
4. Titov A.G., Gordov E.P., Okladnikov I.G., Shulgina T.M. Web-system for processing and visualization of meteorological data for Siberian environment research // Int. J. of Digital Earth. 2009. V. 2, iss. S1. P. 105–119. doi: 10.1080/17538940902866187.
5. Peterson T.C. Climate Change Indices // WMO Bulletin. 2005. V. 54, N 2. P. 83–86.
6. Тумов А.Г. RDF-схема для метаданных по метеорологии и климату // Измерения, моделирование и информационные системы для изучения окружающей среды / Под общей редакцией проф. Е.П. Гордова. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2006. С. 58–61.
7. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. March 1996. V. 77, N 3. P. 437–471.
8. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP II Reanalysis (R-2) // Amer. Meteorol. Soc. November 2002. P. 1631–1643.
9. Onogi J.T., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi Sh., Hatushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura Sh., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N., Taira R. The JRA-25 Reanalysis // J. Meteorol. Soc. Jap. 2007. V. 85, N 3. P. 369–432.
10. ERA-40 Project Report Series: European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2007.
11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hylm E.V., Isaksen L., Kellberg P., Kuhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.J., Park B.K., Peubey C., De Rosnay P., Tavola

- to C., Thiupaut J.N., Vitart F. // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
12. Kamiguchi K., Arakawa O., Kitoh A., Yatagai A., Hamada A., Yasutomi N. Development of APHRO\_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years // Hydrol. Res. Lett. 2010. V. 4. P. 60–64.
  13. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M.C., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli T., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 1–28. doi: 10.1002/qj.776.
  14. Saha S., Moorthi Sh., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Van Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Van Den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Cheliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou Sh., Higgins W., Zou Ch.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91, iss. 8. P. 1015–1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
  15. Evans J.P., McCabe M.F. Evaluating a regional climate model's ability to simulate the climate of the South-east coast of Australia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2010. V. 11. P. 012004.
  16. Evans J.P., McCabe M.F. Regional climate simulation over Australia's Murray – Darling basin: A multitemporal assessment // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. D14114. doi: 10.1029/2010JD013816.
  17. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / NCAR technical note NCAR/TN-475+STR, 2008.
  18. Wei W., Bruyere C., Duda M. ARW version 3 system / User's Guide. NCAR, 2009.
  19. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecast of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part 1: Description and sensitivity analysis // Mon. Weather Rev. 2004. V. 132. P. 519–542.
  20. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 16663–16682.
  21. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization for atmospheric studies // NASA/TM-1999-10460. V. 15. 38 p.
  22. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Информационно-вычислительные системы на основе веб-технологий для исследования региональных природно-климатических процессов // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. Специальный выпуск № 3. С. 20–29.
  23. 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. Специальный выпуск № 3. С. 64–69.
  24. Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
  25. Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Использование технологий Semantic Web в информационно-вычислительной системе для анализа данных по окружающей среде // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. 2010. Т. 8, вып. 1. С. 60–67.
  26. Кошкарев А.В. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных / А.В. Кошкарев, В.М. Ряховский, В.А. Серебряков // Открытое образование. 2010. № 5. С. 61–73.
  27. Кабанов М.В., Лысков В.Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 753–764.
  28. Докарев Е.А. Изменчивость климата Западной Сибири во второй половине XX века // География и природные ресурсы. 2005. № 4. С. 70–75.
  29. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 6. С. 814–817.
  30. IPCC: Climate Change 2001 / The Scientific Basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) / Eds.: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, I. Xiaosu. Cambridge university press, 2001. 944 p.
  31. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. М.: Высш. школа, 1984. 248 с.
  32. Razuvaev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A., Steurer P., Vose R. Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations. ORNL/CDIAC, Numerical data package – 040, Oak Ridge National laboratory. 1993. Oak Ridge. Tennessee. USA.
  33. McNulty S.G., Aber J.D. US National Climate Change Assessment on Forest Ecosystems: An Introduction // BioScience. 2001. V. 51, N 9. P. 720–722.
  34. Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L. Forest-tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia // Scandinv. J. of Forest Res. 2010. V. 25, iss. 3. P. 224–233.
  35. Зукерт Н.В., Рожкова С.В., Соколухина Н.Н. Роль гидротермического режима в распределении растительности в Якутии // Лесоведение. 1995. № 2. С. 42–49.

*E.P. Gordov, I.G. Okladnikov, A.G. Titov, V.Yu. Bogomolov, T.M. Shulgina, E.Yu. Genina. Geo-information system for investigation of regional climatic changes and first results obtained.*

Information-computational system for statistical processing and analysis of archives of spatially-referenced modeling and observational geophysical data is described. The system developed allows one to choose territory and characteristics to be analyzed and processed with subsequent visualization of the results. As one of the system's applications, computational modules were developed to analyze regional peculiarities of dynamics of the main climatic characteristics and their interrelations, as well as to plot graphs, diagrams and mapped fields using web-GIS-technologies.

Efficiency of the information-computational system is illustrated by the example of investigation of spatio-temporal behavior of surface air temperature and precipitation in Siberia in terms of the following climatic indices: annual and seasonal dynamics of meteorological characteristics, growing season length, sum of day-averaged temperature above 5 °C, as well as precipitation total and intensity.



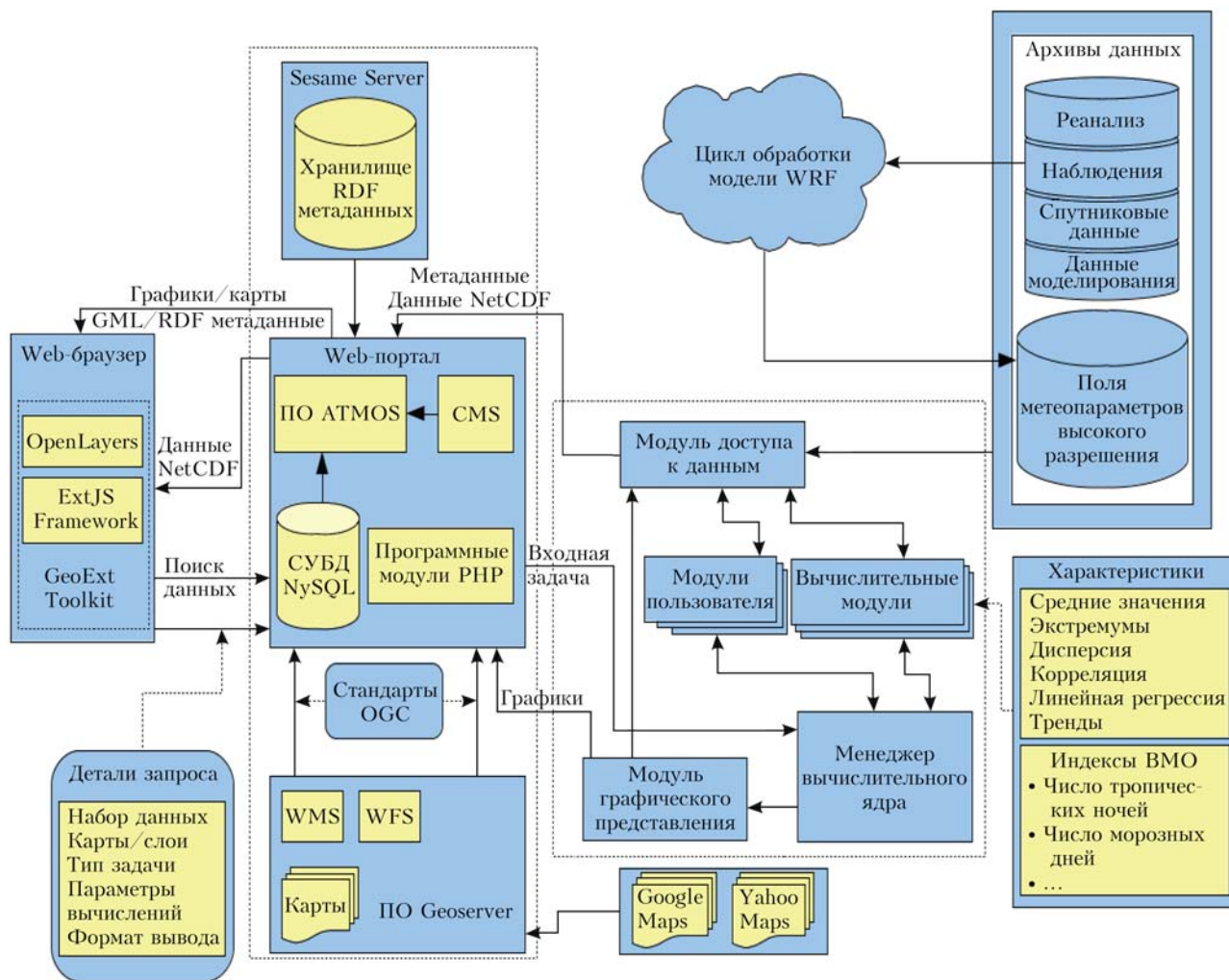


Рис. 1. Общая архитектура разрабатываемой системы

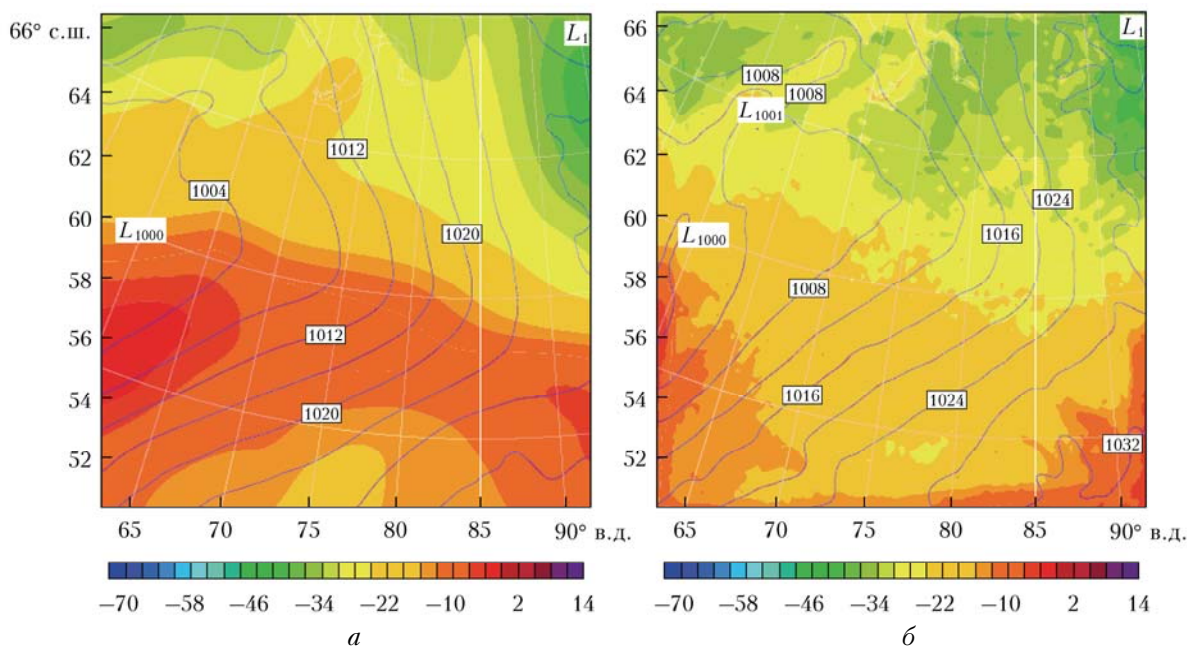


Рис. 2. Поле температуры на высоте 2 м для 02.02.1999: *a* – полученное процедурой восстановления на основе глобального реанализа ECAMWF ERA-40; *б* – полученное на основе моделируемых полей с пространственным разрешением 20 км



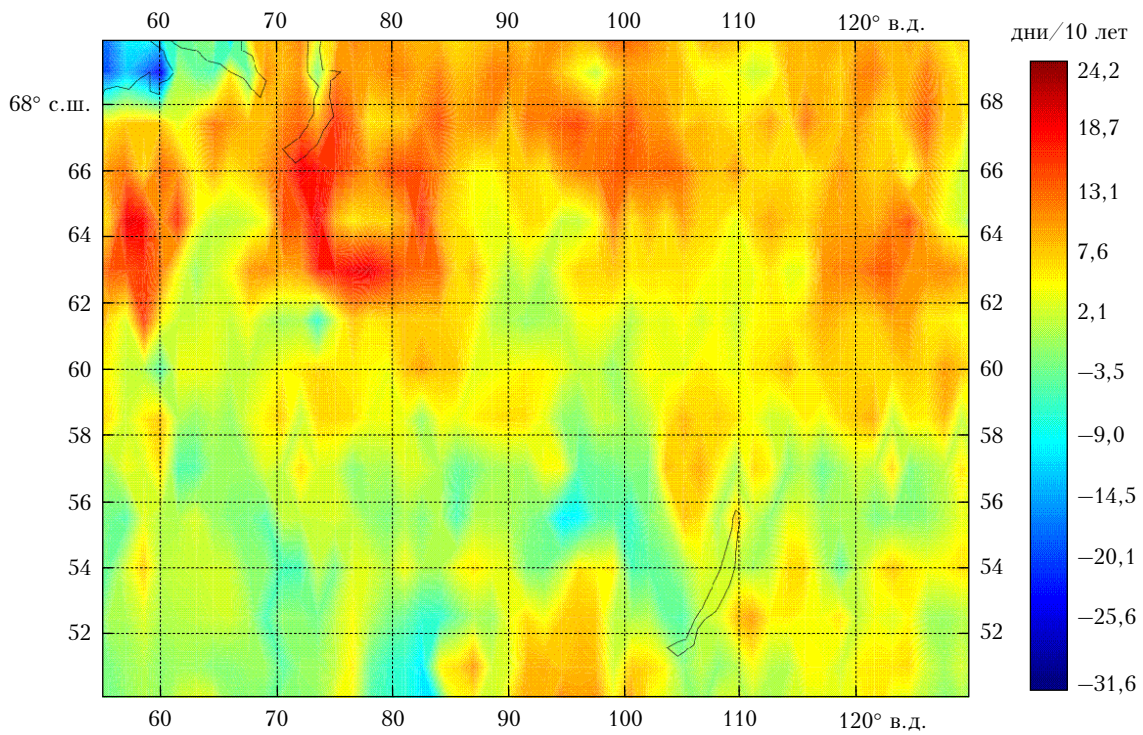


Рис. 3. Тренд продолжительности вегетационного периода года со среднесуточной температурой > 5 °С

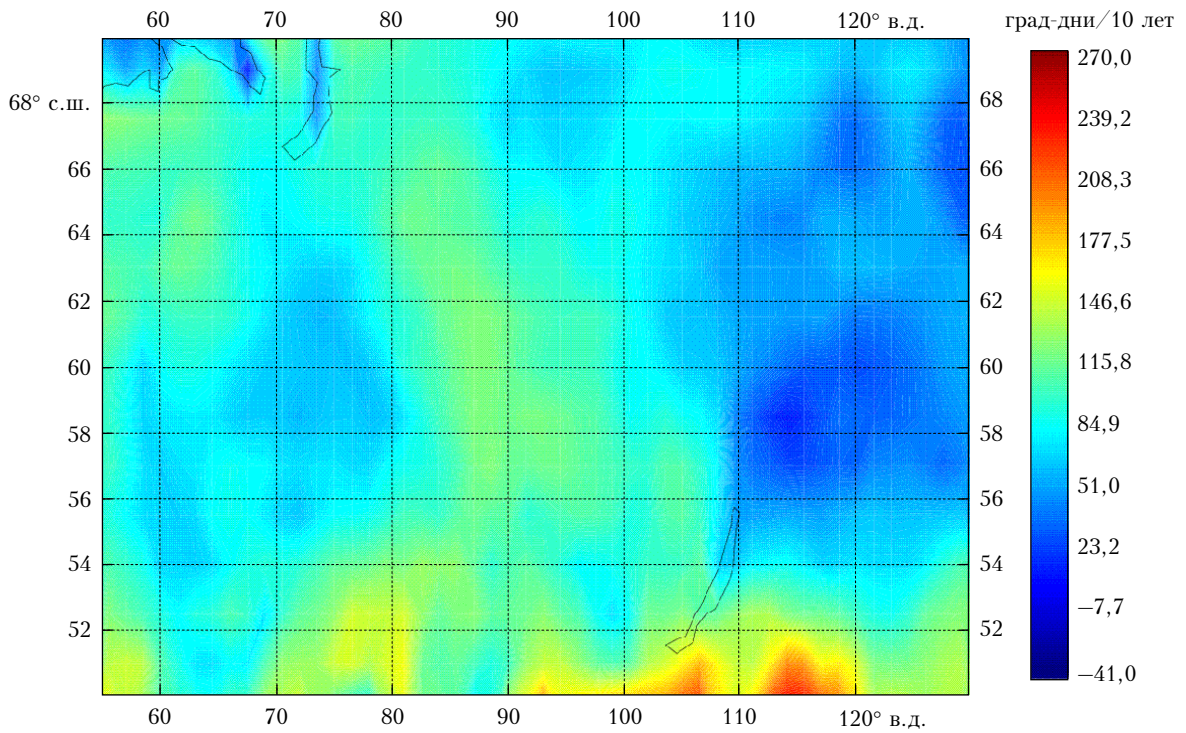


Рис. 4. Тренд суммы эффективных температур со среднесуточной температурой > 5 °С