

УДК 519.222:551.583:004.75

**Т. М. Шульгина, Е. П. Гордов, И. Г. Окладников, А. Г. Титов, Е. Ю. Генина
Н. П. Горбатенко, И. В. Кужевская, А. С. Ахметшина**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
пр. Академический, 10/3, Томск, 634055, Россия

Томский филиал Института вычислительных технологий СО РАН
пр. Академический, 10/4, Томск, 634055, Россия

Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

E-mail: stm@scert.ru

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ*

Представлен подход, реализующий количественное описание пространственных и временных региональных климатических изменений с использованием набора апробированных методов математической статистики для получения ключевых характеристик, определяющих как динамику климатических процессов, так и их экстремальные проявления. Описаны основные результаты разработки комплекса программ, реализующего предложенный подход, и его применения для анализа современных изменений приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири.

Ключевые слова: анализ временных рядов, методы математической статистики, региональные климатические изменения.

Введение

Происходящие в последние десятилетия изменения климата вызвали стремительное развитие технологий их мониторинга и моделирования [1–5]. Накапливаемые архивы метеорологической и климатической информации, полученной в результате наземных наблюдений, дистанционного зондирования, работы различных климатических и метеорологических моделей и международных программ их сравнения, таких как СМIP [6], появление реанализов нового поколения [7–8], а также доступность архивов, используемых при подготовке оце-

* Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», госконтракт № 07.514.11.4044, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, госконтракт № 8345), проектами СО РАН (№ IV.31.1.5, IV.31.2.7), проектами РФФИ (№ 10-07-00547а, 11-05-01190а) и интеграционными проектами СО РАН (№ 69, 131, 140).

Шульгина Т. М., Гордов Е. П., Окладников И. Г., Титов А. Г., Генина Е. Ю., Горбатенко Н. П., Кужевская И. В., Ахметшина А. С. Комплекс программ для анализа региональных климатических изменений // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11, вып. 1. С. 124–131.

ночных докладов IPCC¹ открывают перед исследователями широкие возможности для изучения сложных механизмов меняющегося климата. В свою очередь, растет количество различных методов обработки архивов данных, позволяющих учесть особенности используемого материала и более детально изучить закономерности наблюдаемых климатических изменений. С увеличением доступных методов обработки и объемов метеорологической и климатической информации правильная организация процесса обработки и анализа таких данных становится одним из актуальных вопросов. Это связано прежде всего с тем, что произвольность выбора исследователем исходных данных и методов анализа существенно ограничивает возможности сравнения и сопоставления результатов, получаемых разными авторами при изучении климатических изменений одного и того же региона. Кроме того, стремительно растущие объемы архивов пространственно-привязанных геофизических данных требуют для их обработки привлечения специализированных программных инструментов высокого уровня, что не всегда доступно специалистам из предметных областей.

Систематизированная обработка пространственно-привязанных геофизических данных различного происхождения с использованием широкого набора апробированных статистических методов обеспечит комплексный подход к задаче исследования региональных климатических изменений и возможность сопоставления результатов, получаемых на основе этих данных. Подход, нацеленный на выявление особенностей общей динамики и экстремальных явлений климата, откроет возможности для углубленного изучения климатических процессов в региональном масштабе и позволит существенно упростить работу специалистов предметных областей с большими архивами пространственно-привязанных геофизических данных.

В рамках формирования программного комплекса для проведения мониторинга и прогноза региональных климатических изменений [9; 10] разработан и реализован в виде набора программных модулей подход к комплексному описанию региональных климатических изменений, обеспечивающий как подбор достоверной исходной метеорологической информации, так и получение ключевых статических оценок общей динамики и экстремальных явлений климата региона.

Описание подхода

Поскольку климат определяется как статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой (атмосфера – океан – суша) за несколько десятилетий [3; 11], корректное описание его динамики возможно только на основе комплексного использования средств вероятностно-статистического аппарата [12; 13]. В рамках настоящей работы для выявления климатических взаимосвязей и закономерностей разработан подход с использованием статистических методов для выбора данных моделирования, наиболее близко воспроизводящих наблюдаемые значения метеорологических величин, и получения на их основе ряда статистических оценок общей динамики и экстремальных проявлений климата региона. Необходимость подбора данных моделирования для анализа обусловлена следующими фактами. Несмотря на то, что метеорологическая информация, полученная с сети метеостанций², считается наиболее достоверной, сеть наблюдений неравномерна и разрежена по территории, что не позволяет получить детальной картины изменения климатических характеристик при пространственном обобщении этой информации. Архивы данных моделирования, например реанализов первого поколения [14], решают эту проблему, но их существенным недостатком является различие в значениях метеорологических величин, получаемых с использованием разных глобальных моделей, что приводит к расхождению результатов исследования и влияет на точность получаемых оценок климатических изменений.

Для решения задачи выбора метеорологических полей моделирования разработана методика сравнения данных моделирования с рядами инструментальных наблюдений в координа-

¹ IPCC Data distribution Center. URL: <http://www.ipcc-data.org>

² Булыгина О. Н., Разуваев В. Н. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на 223 метеорологических станциях. URL: <http://www.meteo.ru/climate/descrip1.htm>

тах отдельных метеостанций. Методика построена на применении ряда апробированных статистических методов и включает следующие шаги.

- Выбор однородных временных рядов метеорологических наблюдений по результатам анализа информативности рядов. В частности, в пределах суток должен быть полный набор измерений метеорологической величины, согласно стандартам установленной системы наблюдений, в пределах месяца – пропуски не более чем за трое изолированных друг от друга суток, в рамках года – измерения за все 12 месяцев с учетом выполнения условий для месяца. Для всего временного промежутка исследования допускается не более 5 % пропусков от количества рассматриваемых лет, с учетом выполнения условий для года. В противном случае наблюдения исключаются из рассмотрения на каждом этапе проверки условий (сутки / месяц / год). Отобранные в результате анализа временные ряды наблюдений обеспечивают объем информации, необходимый для достоверного воспроизведения временной динамики метеорологической величины.

- Интерполирование данных моделирования в координаты положения станций выбранных рядов. В работе для решения этой задачи был выбран модифицированный метод Шепарда [15], основная идея которого заключается в построении сглаженной двумерной функции C , интерполирующей значения f_k в разбросанных узлах (x_k, y_k) на плоскости для $k=1, 2, \dots, N$. Интерполянт определен как

$$C(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N W_k(x, y) C_k(x, y)}{\sum_{i=1}^N W_i(x, y)},$$

где точечная функция C_k есть двумерный кубический полином, который интерполирует значения f_k в узлах k и подгоняет значения на набор близлежащих узлов в виде взвешенных наименьших квадратов.

- Статистическая оценка различий интерполированных в координаты метеостанций значений данных моделирования и измеренных на этих метеостанциях значений метеорологических величин. Сравнение полученных временных рядов построено на расчете среднего и среднеквадратического отклонений, оценке однородности по критериям Хи-квадрат и Вилкоксона и оценке степени корреляционной связи сравниваемых рядов [16].

Полученные в результате последовательного применения этих процедур сравнительные оценки позволяют выбрать архив моделирования, поля метеорологических величин которого наиболее близко воспроизводят наблюдаемые значения метеорологических величин. Для анализа климатических процессов на основе выбранных наборов данных по результатам обзора научно-исследовательской литературы сформирован перечень ключевых климатических характеристик и апробированных статистических методов, используемых в задачах мониторинга региональных климатических изменений. В частности, в рассмотрение были включены основные статистические характеристики распределений [16], показатели временной структуры метеорологических рядов [12] и показатели экстремальных климатических явлений [17]. Статистические характеристики, дающие наиболее важную информацию о режиме метеорологической величины, представлены:

- средним арифметическим временного ряда значений метеорологической величины;
- дисперсией временного ряда значений метеорологической величины;
- среднеквадратическим отклонением временного ряда значений метеорологической величины;
- наибольшим и наименьшим значениями метеорологической величины во временном ряде.

Показатели временной структуры метеорологических рядов представлены следующими характеристиками:

- суточная и годовая амплитуда значений метеорологической величины, которые выражены разницей между наибольшим и наименьшим наблюдаемыми значениями этой метеорологической величины в заданных временных пределах;
- продолжительность вегетационного периода года, описывающая динамику приземной температуры воздуха посредством учета годового количества дней между первым интервалом s , по меньшей мере, шестью днями со среднесуточной температурой выше заданного

значения и первым интервалом с начала первого июля с, по меньшей мере, шестью днями со среднесуточной температурой ниже заданного значения (5, 10, 15 °C либо другая фиксированная величина);

- сумма эффективных температур, представленная суммарной величиной средних суточных температур воздуха или почвы, уменьшенных на величину температуры 5 °C:

$$T_j = \sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}, \quad \Delta x_{ij} = x_{ij} - 5,$$

где x_{ij} – средняя суточная температура дня i периода j , n – количество дней, когда x_{ij} превысило пороговое значение в 5 °C [13];

- суммарное количество осадков;
- индекс интенсивности осадков, пропорциональный количеству осадков, выпадающих за сутки:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где x_i – суточное количество осадков; n – количество дней с осадками³;

- суммарное количество осадков выше заданного значения (10, 20 мм либо другое фиксированное значение) на заданном интервале времени.

Кроме того, решение многих задач анализа климатических процессов связано с изучением экстремальных явлений, сведения о которых могут быть получены из крайних значений метеорологических элементов, абсолютных экстремумов и квантилей. Набор отобранных для расчета климатических характеристик расширен следующими индексами изменения климата, предложенными Группой экспертов по обнаружению, мониторингу и индексам изменения климата Комиссии по климатологии ВМО (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/indices.shtml>) [17]:

- наименьшее значение метеорологической величины внутри ряда, составленного из наибольших значений этой метеорологической величины внутри отдельных временных сегментов. Для ряда временных сегментов $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ измерений метеорологической величины $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i = 1, \dots, n$, определяется ряд максимальных значений метеорологической величины $x_{\max, i} = \max(x_i)$, $i = 1, \dots, n$, по каждому сегменту, из которого определяется минимальная величина $x_{\min} = \min(x_{\max})$;

- наибольшее значение метеорологической величины внутри ряда, составленного из наименьших значений этой метеорологической величины внутри отдельных временных сегментов. Для ряда временных сегментов $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ измерений метеорологической величины $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i = 1, \dots, n$, определяется ряд минимальных значений метеорологической величины $x_{\min, i} = \min(x_i)$, $i = 1, \dots, n$, по каждому сегменту, из которого определяется максимальная величина $x_{\max} = \max(x_{\min})$;

- количество дней в году с наименьшей суточной температурой воздуха ниже 0 °C (количество дней с заморозками);
- количество дней в году с максимальной суточной температурой воздуха выше 25 °C (количество жарких дней);
- количество дней в году с максимальной суточной температурой воздуха ниже 0 °C (количество морозных дней);
- количество дней с минимальной суточной температурой воздуха выше 20 °C, т. е. для суток i периода j (количество душных ночей);
- одно-, пятидневный период с максимальным количеством осадков для отдельного месяца;
- продолжительность периода без осадков, выраженная максимальной непрерывной последовательностью дней с суточным количеством осадков ниже 1 мм;

³ APHRODITE JMA. URL: http://www.chikyu.ac.jp/precip/data/APHRO_V1003R1_readme.txt

- продолжительность периода с осадками, выраженная максимальной непрерывной последовательностью дней с суточным количеством осадков выше 1 мм.

Особенности временной динамики указанных климатических характеристик определяются долговременными составляющими временных рядов – трендами, позволяющими оценить тенденцию изменения метеорологической величины, оценкой статистической значимости выявленных тенденций, а также степенью корреляционных связей метеорологических явлений [16].

Такая последовательность процедур, включающая вычисление климатических показателей, изучение их пространственной и временной динамики, позволяет получить наиболее полное представление об особенностях происходящих колебаний климатической системы изучаемого региона.

Комплекс вычислительных программ

Предложенный подход исследования реализован в виде набора программных модулей с использованием языков программирования высокого уровня ITTVIS Interactive Data Language 7.0 (IDL) и GNU Data Language (GDL). Для работы используются архивы данных инструментальных наблюдений, результаты метеорологического и климатического моделирования, в частности архивы данных реанализов первого поколения [14]. Разработанные модули являются независимыми относительно обрабатываемой метеорологической информации и пространственно-временных границ. Созданный комплекс программ имеет возможность автономной работы в среде IDL. Также этот комплекс программ был интегрирован в вычислительное ядро программного комплекса создаваемой информационно-вычислительной инфраструктуры для проведения мониторинга и прогноза региональных климатических изменений. В частности, вычислительное ядро обеспечивает чтение и обработку XML-файла задания, содержащего указания на используемые данные, пространственную и временную область исследования, последовательность характеристик и методов анализа, параметры вывода результатов в графические файлы, которое сформировано пользователем при помощи графического интерфейса программного комплекса, и последующее конвейерное выполнение на его основе последовательности вызовов программных модулей для обработки и анализа пространственно-привязанных геофизических данных. В процессе выполнения конвейера промежуточные результаты расчетов с выхода одного модуля передаются на вход другого согласно заданной последовательности. По окончании заданной последовательности расчетов модуль вывода и визуализации производит запись результатов в файлы формата GeoTIFF, EPS, PNG, ESRI Shapefile.

Таким образом, в разработанный комплекс программ вошли:

- модуль расчета среднего значения метеорологической величины по времени, по пространству;
- модуль расчета дисперсии;
- модуль расчета стандартного отклонения;
- модуль расчета значения абсолютного максимума метеорологической величины;
- модуль расчета значения абсолютного минимума метеорологической величины;
- модуль определения минимального значения из ряда максимальных значений метеорологической величины;
- модуль определения максимального значения из ряда минимальных значений метеорологической величины;
- модуль расчета суточной амплитуды значений метеорологической величины;
- модуль расчета количества дней с заморозками;
- модуль расчета количества жарких дней;
- модуль расчета количества морозных дней;
- модуль расчета количества душных ночей;
- модуль расчета продолжительности вегетационного периода;
- модуль расчета показателя суммы эффективных температур;
- модуль расчета суммарного количества осадков;
- модуль расчета индекса интенсивности осадков;

- модуль расчета количества дней с осадками выше заданного значения;
- модуль для определения дня с максимальным количеством осадков;
- модуль для определения 5-дневного периода с максимальным количеством осадков;
- модуль для определения максимальной продолжительности периода без осадков;
- модель для определения максимальной продолжительности периода с осадками;
- модуль расчета коэффициентов линейной регрессии;
- модуль интерполяции данных с равномерной сеткой в координаты положения метеостанций;
- модуль сравнения данных из двух разных архивов.

Для работы со спутниковыми данными были разработаны:

- модуль расчета индекса NDVI по спутниковым данным, где в качестве исходных данных модуля используются данные спутниковых наблюдений в двух каналах – NIR band и R band, соответствующих излучению в близком инфракрасном и красном диапазонах спектра соответственно. Расчет производится по формуле

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - R) / (\text{NIR} + R);$$

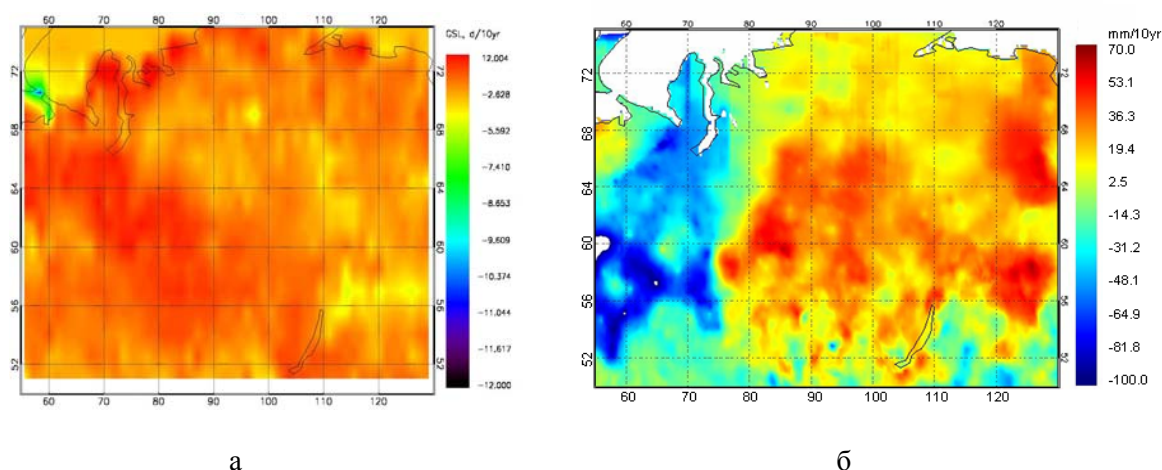
- модуль получения изображения в псевдоестественной цветовой гамме по спутниковым данным, где в качестве исходных данных модуля используются данные спутниковых наблюдений в трех каналах – R band, G band и B band, соответствующих излучению в красном, зеленом и синем диапазонах спектра соответственно. Результатом работы модуля является 24-битное изображение в формате GeoTIFF, где первые 8 бит соответствуют красному, вторые 8 бит – зеленому и третьи 8 бит – синему диапазонам спектра.

Апробация комплекса программ

Эффективность предложенного подхода исследования и использования разработанного комплекса программ была изучена на примере пространственной и временной изменчивости климатических характеристик приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири для периода с 1979 по 2010 г. В соответствии с предложенной методикой выбора данных для описания многолетних изменений приземной температуры воздуха на территории Сибири выбран архив данных реанализа ECMWF ERA Interim [7], представляющих собой поля срочных измерений метеовеличины на равномерной горизонтальной сетке размерности $1,5 \times 1,5^\circ$, полученные в результате работы глобальной климатической модели. Для описания изменений количества осадков выбран архив данных APHRODITE JMA, содержащий поля суточных значений количества осадков, полученные путем интерполяции станционных наблюдений метеовеличины на горизонтальную равномерную сетку размерности $0,5 \times 0,5^\circ$. Построены карты количественных изменений климатических характеристик на территории региона и проведен их анализ.

Анализ приземной температуры воздуха позволил уточнить пространственные масштабы обнаруженных ранее изменений средних годовых температур с очагами потепления в верхних широтах Восточной Сибири ($0,6-1,0^\circ\text{C}/10$ лет) и слабой тенденцией к похолоданию в ее центральной части – до $-0,2^\circ\text{C}/10$ лет. Динамика температур весеннего и осеннего сезонов, сопровождающаяся ростом температур весной до $1,2^\circ\text{C}/10$ лет (в апреле) на востоке, до $1,1^\circ\text{C}/10$ лет (в мае) на западе Сибири и осенью – до $1,4^\circ\text{C}/10$ лет на востоке (в ноябре) и $1,1^\circ\text{C}/10$ лет (в октябре) на западе Сибири, нашла отклик в колебаниях продолжительности вегетационного периода года (см. рисунок, *a*). На севере Сибири и к югу территории Западной Сибири наблюдается увеличение числа дней со среднесуточной температурой выше 5°C до 15 дней/10 лет. Сумма эффективных температур также растет к югу региона.

Динамика количества осадков холодного (ноябрь-апрель) и теплого (май-октябрь) сезонов на территории Сибири не выражена. Количество осадков холодного периода года характеризуется их увеличением на большей части региона Сибири в среднем на 2 мм/10 лет. Отрицательные величины тренда наблюдаются лишь в верхних широтах Западной Сибири, достигая $-2,5$ мм/10 лет в марте и -7 мм/10 лет в апреле. Для теплого периода года отмечен рост количества осадков (см. рисунок, *b*) на территории Средней и Восточной Сибири, достигающий наибольших значений, 18 мм/10 лет, в июле и августе. Однако территории средних широт Западной Сибири характеризуются уменьшением количества осадков до -6 мм/10 лет (в июне). Анализ интенсивности осадков не выявил значимых изменений числа дней с осадками выше 1 мм, за исключением северного региона, где наблюдается их рост до 5 дней/10 лет.



Тренд продолжительности вегетационного периода года (число дней/10 лет) (а),
 тренд количества осадков для теплого сезона (май-октябрь) (мм/10 лет) (б)

Полученные результаты анализа динамики температуры и количества осадков последних лет хорошо согласуются с результатами других авторов и уточняют пространственные масштабы обнаруженных изменений, что отражает надежность и эффективность использования функциональных возможностей системы для анализа изменения климата и экосистем.

Выводы

Разработанный подход к изучению региональных климатических процессов обеспечивает подбор достоверной метеорологической информации и получение ключевых статических оценок климатических изменений и экстремальных явлений климата. Интеграция созданного комплекса программ, объединяющего процедуры выбора и обработки метеорологических данных, в вычислительное ядро программного комплекса позволяет эффективно выполнить научные исследования в области мониторинга современных климатических изменений и существенно упрощает работу специалистов предметных областей, не имеющих навыков программирования высокого уровня, с большими архивами данных.

Список литературы

1. Анализ изменений климата и их последствий / Под ред. В. Н. Разуваева, Б. Г. Шерстюкова. Обнинск, 2010. 278 с.
2. Кабанов М. В., Лыкосов В. Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 753–765.
3. Дымников В. П., Лыкосов В. Н., Володин Е. М. Проблемы моделирования климата и его последствий: современные проблемы // Вестн. РАН. 2012. Т. 82, № 3. С. 227–236.
4. Елисеев А. В., Аржанов М. М., Демченко П. Фю, Мохов И. И. Изменения климатических характеристик внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 291–304.
5. Школьник И. М., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Хлебникова Е. И., Саль И. А. Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в XXI веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО // Метеорология и гидрология. 2008. № 3. С. 5–15.
6. Taylor K. E. et. al An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // Bulletin of American Meteorological Society. 2012. P. 485–498.

7. *Dee D. P. et al.* The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. No. 656. P. 553–597.
8. *Saha S. et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // Bulletin of American Meteorological Society. 2010. Vol. 91. P. 1015–1057.
9. *Гордов Е. П., Богомолов В. Ю., Генина Е. Ю., Шульгина Т. М.* Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
10. *Гордов Е. П., Богомолов В. Ю., Генина Е. Ю., Окладников И. Г., Титов А. Г., Шульгина Т. М.* 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.
11. *Монин А. С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 247 с.
12. *Кобышева Н. В., Наровлянский Г. Я.* Климатологическая обработка метеорологических наблюдений. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 295 с.
13. *Исаев А. А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1989. 248 с.
14. *Jenne R.* Reanalysis // The Observations and Analysis. Large Scale Observations: A Search Workshop. Seattle, WA, 2001.
15. *Renka R. J.* Algorithm 790 – CSHEP2D: Cubic Shepard Method for Bivariate Interpolation of Scattered Data // ACM Trans. Math Softw. Vol. 25. P. 70–73.
16. *Storch H. von, Zwiers F. W.* Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999. 484 p.
17. *Sillmann J., Roeckner E.* Indices for Extreme Events in Projections of Anthropogenic Climate Change // Climate Change. 2008. Vol. 104. P. 83–104.

Материал поступил в редколлегию 03.12.2012

**T. M. Shulgina, E. P. Gordov, I. G. Okladnikov, A. G. Titov, E. Yu. Genina
N. P. Gorbatenko, I. V. Kuzhevskaya, A. S. Akhmetshina**

**COMPUTATIONAL MODULE
FOR REGIONAL CLIMATE CHANGE ANALYSIS**

An approach is presented that realizes quantitative description of spatiotemporal regional climate changes. Key characteristics determining both dynamics of climatic processes and their extremes are described using a set of approved methods of mathematical statistics. A program system has been developed to realize this approach. The paper presents characteristics of this program system and results of its application to analysis of contemporary changes of surface air temperature and precipitation amount in Siberia.

Keywords: analysis of time series, methods of mathematical statistics, regional climate changes.