

Вычислительный блок информационной веб-ГИС системы для статистического анализа климатических процессов*

© Т.М. Шульгина, Е.П. Гордов, И.Г. Окладников, А.Г. Титов
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск
Отдел проблем информатизации ТНЦ СО РАН
stm@scert.ru

Аннотация

В статье описан разрабатываемый вычислительный блок информационно-вычислительной веб-ГИС системы для анализа рядов пространственно распределенных данных об окружающей среде. Представлен перечень климатических параметров и индикаторов, характеризующих многие аспекты изменения климата. Выбран и уже частично реализован в вычислительном блоке системы набор математических и статистических процедур для вычисления климатических характеристик, наиболее часто используемых в геофизических исследованиях. На этой основе проведено исследование изменения климата на территории Сибири по данным реанализов и инструментальных наблюдений сети наземных метеорологических станций во второй половине XX века. Результаты анализа долгосрочных трендов температуры воздуха и количества осадков показали неоднородную картину изменения этих метеорологических величин на территории Сибири и позволили выявить очаги статистически значимых изменений.

1 Введение

Изучение глобальных климатических процессов в последние десятилетия стало одним из наиболее важных направлений научных исследований. На сегодняшний день научными коллективами разных стран уже достигнут значительный прогресс в этой области. Однако изменение климата происходит не только на глобальном, но и на региональном уровнях. Исследование региональных проявлений глобальных климатических процессов заметно усложняет задачу, т. к. требует комплексного анализа рядов метеорологических данных с использованием апробированных методик. Для проведения детального исследования необходимы поля метеорологических характеристик, которые строятся на основе

проверенных рядов многолетних систематических наблюдений в сети метеорологических станций, и использования современных метеорологических моделей. Здесь необходимо учитывать продолжительность временных рядов, частоту измерений и пространственное разрешение данных, которые влияют на качество анализа и последующий прогноз климатических изменений. Для описания климатических процессов на сегодняшний день широкое применение находят стандартные статистические характеристики, такие, как среднее арифметическое, стандартное отклонение, сглаживание временных рядов и т. д. [1, 16, 3]. Однако в условиях меняющегося климата для изучаемых временных рядов традиционный набор климатических характеристик оказывается недостаточным. Необходимо учитывать возможные экстремальные состояния климатической системы и исследовать поведение максимальных и минимальных значений метеорологических величин. В качестве примера можно привести набор индексов, характеризующих экстремальные значения ежесуточной температуры и количества осадков, разработанный Группой экспертов по обнаружению, мониторингу и индексам изменения климата Комиссии по климатологии ВМО [28]. В свою очередь, с целью упрощения и стандартизации процессов вычислений на основе больших архивов данных создаются научные сайты и порталы, содержащие средства для визуализации и простейшего анализа рядов данных метеорологических наблюдений. Примерами таких порталов могут служить KNMI Climate Explorer [25], ECA&D [20], NASA GES DISC [22], CLIMVIS [27] и другие, позволяющие выполнять базовые математические и статистические процедуры на основе данных моделирования и наблюдений, а также представлять результаты вычислений в виде временных графиков и двумерных карт поверхности. Однако в настоящее время данные системы не предоставляют функциональности, необходимой для комплексного анализа геофизических процессов, т. к. большинство из них нацелено только на визуализацию имеющейся метеорологической информации.

В настоящей работе представлены этапы разработки вычислительного блока информационно-вычислительной веб-ГИС системы для комплексного анализа временных рядов пространственно-распределенных данных об окружающей среде, и дано

Труды 12^й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2010, Казань, Россия, 2010

описание запланированных и уже реализованных процедур. Разрабатываемый блок информационно-вычислительной системы должен удовлетворять нескольким основным условиям. Прежде всего, для исследования должны быть использованы проведенные ряды многолетних систематических наблюдений метеорологических величин. Также, вычислительный блок системы должен предоставлять широкий спектр вычислительных процедур, позволяющих проводить комплексное исследование поведения метеорологических и климатических характеристик, как на глобальном, так и на региональном уровнях. Результаты вычислений должны быть представлены как графически, в виде карт поверхности, временных рядов или диаграмм, так и в виде файла в выбранном формате, что поможет исследователю использовать их в дальнейшем.

2 Разработка вычислительного блока

На сегодняшний день создаваемая информационно-вычислительная система, рабочий прототип которой описан ранее [8, 30], использует следующие архивы пространственно-распределенных геофизических данных: NCEP/NCAR Reanalysis [18, 23], NCEP/DOE AMIP II Reanalysis-2 [19], Reanalysis ECMWF ERA-40 [13], Japanese 25-year Reanalysis [26], NOAA-CIRES 20th Century Global Reanalysis [24]. Особенностью этих данных являются равномерное покрытие территории и широкий набор метеорологических параметров для различных временных сегментов. Данные были преобразованы в форматы NetCDF и HDF5 как наиболее удобные для хранения, поиска и доступа. В будущем система также обеспечит работу с архивом данных инструментальных наблюдений метеорологических станций на территории бывшего Советского Союза, 9092c Synoptic Network [12]. Однако следует отметить, что основная масса метеостанций сосредоточена в густонаселенных районах, в то время как количество станций в полярных, горных и океанических районах не обеспечивает возрастающие потребности метеорологических исследований.

На основе анализа материала отечественных и зарубежных источников был создан перечень климатических параметров и индикаторов, характеризующих основные аспекты глобальных климатических изменений, а также разработан набор математических и статистических процедур для описания поведения и изменчивости исследуемых метеорологических и климатических характеристик. В качестве базовых метеорологических параметров в системе используются температура воздуха, давление, влажность, осадки, скорость ветра, облачность и т. д. [10]. Для характеристики климатических процессов применяется статистическое описание в терминах средних величин, экстремальных показателей и частот явлений за выбранный период времени. Вычислительный блок информационно-вычислительной веб-ГИС системы позволяет производить вычисление среднего арифметического и среднеквадратического отклонения для различных времен-

ных периодов. Наряду с процедурой осреднения используется сглаживание временных рядов, основанное на переходе от начальных значений временного ряда к их средним значениям на заданном интервале времени [3]. Другими общими процедурами исследования временных рядов, реализуемыми в веб-ГИС системе, являются линейный тренд и линейная корреляция. Тренд оценивается как разность между метеорологическими элементами для двух заданных интервалов времени, а также по методу наименьших квадратов. Большинство современных исследований построено на анализе трендов метеорологических параметров, рассчитанных по широтам, полушариям и земному шару. Разрабатываемый вычислительный блок позволит выполнять построение трендов как осредненных по территории, так и построить поле значений тренда, что позволит проследить динамику пространственных изменений метеорологических величин. Значимость трендов определяется по статистическим критериям Стьюдента и Фишера [7, 11, 29, 31, 32], в случае нормального распределения выборки, а также с помощью рангового критерия Тау-Кендала [9, 29], если распределение выборки неизвестно. Для определения существования линейной взаимосвязи между двумя метеорологическими величинами используется коэффициент корреляции, который будет представлен как классическим коэффициентом корреляции Пирсона, так и непараметрической альтернативой рангового коэффициента корреляции Спирмана [21, 29].

Несмотря на популярность базовых статистических методов, применение находят и более сложные методики, отражающие неоднородную изменчивость атмосферных параметров в пространственном и временном масштабах. Интерес представляет изучение экстремальных значений метеорологических параметров. С этой целью используются индексы изменения климата, рассмотренные и отобранные Группой экспертов по обнаружению, мониторингу и индексам изменения климата Комиссии по климатологии ВМО [28]. Индексы, характеризующие экстремальные значения ежесуточной температуры и количества осадков, представлены как процентиля, пороговые значения, индексы продолжительности периода с заданными условиями [28]. В частности, максимальные и минимальные ежемесячные значения максимальных и минимальных дневных температур определяют абсолютные экстремумы температур внутри изучаемого года. Внутригодовой разброс температур учитывает экстремально высокую температуру летнего сезона и предельно низкую температуру зимнего сезона. Продолжительность термального вегетационного периода способна отразить аномалии весны и осени [14]. Индекс максимального количества осадков за пять дней может являться индикатором наводнений, а продолжительность сухих дней выделяет регионы подверженные засухам. Также, важной для анализа является возможность сравнения метеорологических и климатических характеристик, полученных на основе

различных наборов данных. Уже реализованный прототип системы [8] позволяет вычислять абсолютную и нормализованную разницу между сравниваемыми величинами, что существенно на начальном этапе исследования климатических особенностей выбранной для анализа территории.

На начальном этапе вычислительный блок был реализован в рамках веб-системы для обработки и визуализации метеорологических данных (<http://risks.scert.ru>) [30], с использованием программного пакета GrADS (Grid Analysis and Display System) [15]. В системе реализованы вычисления и визуализация вышеуказанных климатических характеристик с использованием средств математической статистики [8, 30]. Так как разрабатываемая новая версия информационно-вычислительной системы ориентирована на использование веб- и ГИС-технологий, программные модули вычислительного блока реализуются на языке IDL (Interactive Data Language) [17], предоставляющем более широкий набор функций. По окончании расчетов результаты выводятся в файлы форматов Encapsulated Postscript, GeoTIFF и

ESRI Shapefile в виде временных графиков или двумерных карт поверхности.

Чтобы проиллюстрировать полученные результаты, рассмотрим поведение метеорологических величин, характеризующих климатические изменения, происходившие на территории Сибири. Отметим, что эти изменения имеют не только региональное, но глобальное значение [6]. На языке IDL реализованы программные модули для вычисления статистических характеристик, таких, как средние, максимальные, минимальные значения, стандартное отклонение для различных интервалов времени, сглаживание временных рядов с заданной шириной окна. Также с помощью системы рассчитаны некоторые индексы климатических экстремалей, такие как число морозных и летних дней, число дней с заморозками и количество тропических ночей, дневное и годовое колебание температур, количество осадков с дневной нормой из заданного диапазона и т. д.

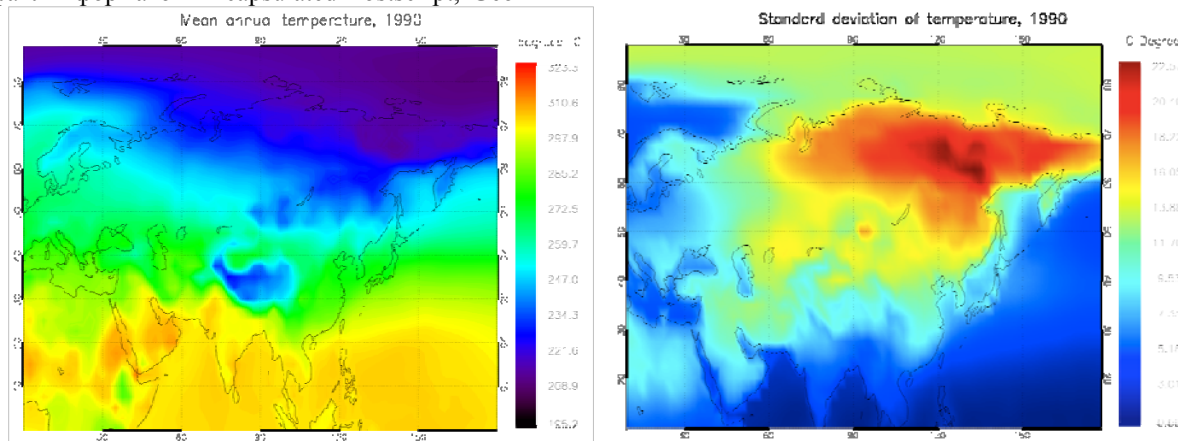


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха и стандартное отклонение температуры воздуха, 1990 г., данные ECMWF ERA-40

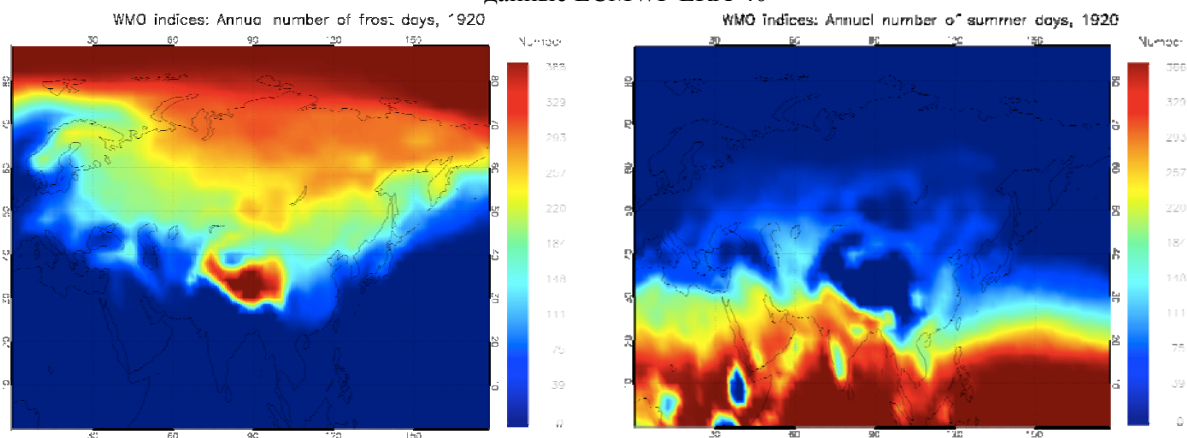


Рис. 2. Индексы изменения климата «Число морозных дней» и «Число летних дней», 1920 г., данные NOAA Reanalysis

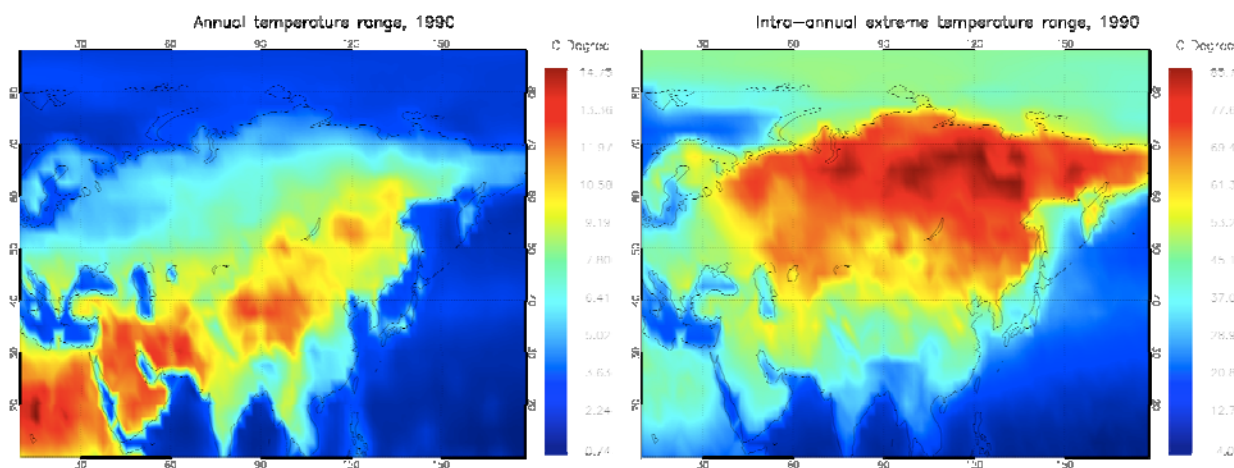


Рис. 3. Колебание дневной температуры воздуха и колебание годовой температуры воздуха, 1990 г., данные Реанализа ECMWF ERA-40

Для проверки работоспособности блока и тестирования получаемых результатов рассмотрено поведение приземной температуры на территории Сибири. Следует отметить, что исследованию изменения климата Сибири посвящено большое количество работ [4 – 6], большинство которых описывает результаты, полученные на основе инструментальных данных наблюдений с метеорологических станций.

С помощью разработанного вычислительного блока информационно-вычислительной системы был проведен анализ некоторых характеристик температуры воздуха на территории Сибири по данным ECMWF ERA-40 и станционным наблюдениям. Для выявления динамики изменения климатических характеристик на основе имеющихся наборов данных рассчитаны тренды, оценена их статистическая значимость, а также проведено сравнение результатов, полученных на основе различных наборов данных. Тренды среднегодовой температуры, рассчитанные по данным Реанализа ERA-40 и наблюдениям метеорологических станций, принимают положительные значения на большей части территории Сибири, равные $0,4 - 0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в отдельных районах – до $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет. Анализ сезонных и ежемесячных температур выявил особенности формирования среднегодовой динамики метеовеличины. А именно, основной вклад вносят потепления зимы ($0,7 - 0,9^{\circ}\text{C}/10$ лет) и весны ($0,5 - 0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет), в то время как изменение температуры воздуха для летнего и осеннего сезонов статистически не значимо. Наряду с анализом осредненных метеорологических характеристик изучено поведение индексов климатических экстремалей, касающихся температуры воздуха и количества осадков [28]. Тренд числа морозных дней показывает их уменьшение в среднем на 2 дня каждые 10 лет на большей части территории Сибири. Подобная картина прослеживается и в случае максимальных значений температуры, не превышающих порогового значения в 0°C (тренд для индекса «число дней с заморозками»). Следует отметить, что на территории Западной Сибири данные

изменения являются статистически значимыми согласно критерию Стьюдента. Тренд, рассчитанный для числа летних дней в году, не выявил значимых изменений числа дней с максимальной дневной температурой превосходящей 25°C . Следует также отметить влияние климатических изменений на биологические процессы, проходящие в различных экосистемах окружающей среды. В частности, в лесной продуктивности, которая играет важную роль в формировании глобального углеродного баланса [2]. Существует ряд климатических индикаторов, определяющих развитие лесных экосистем и их вклад в баланс углерода, таких, как продолжительность теплого периода года и вегетационного сезона, оттепелей в зимний период года и заморозков в течение теплого сезона, сумма эффективных температур и т. д. Некоторые из них были рассчитаны для территории Сибири. Результаты вычислений выявили тенденцию к увеличению продолжительности теплого и вегетационного сезонов со среднесуточной температурой больше 0°C и 5°C соответственно в среднем на 2 – 3 дня/10 лет. Расчеты, полученные для дней с оттепелями (среднесуточная температура выше -2°C), выявили увеличение количества дней с оттепелями в среднем на 2 – 4 дня каждые 10 лет на севере и востоке территории Западной Сибири.

Заключение

Таким образом, показано, что вычислительный блок создаваемой информационной системы позволяет упростить и унифицировать первичный анализ климатических изменений на выбранной территории. Полученные результаты не только адекватно отображают процесс климатических изменений на территории Сибири, но и существенно уточняют его. Дальнейшее развитие вычислительного блока и его интеграция в разрабатываемую веб-ГИС систему позволит превратить ее в рабочий инструмент проведения мультидисциплинарных исследований, как климатических изменений, так и их влияния на ди-

намику растительных экосистем на выбранной территории.

Литература

- [1] Горбачевич В.В. Анализ и прогнозирование временных рядов. – М.: 2000. – Часть 2. – 26 с.
- [2] Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Пространственно-временное поведение климатических характеристик, контролирующих развитие бореальных экосистем России в конце XX века // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса. Материалы Всерос. конф. с участием иностранных ученых, Красноярск, 2009. – С. 58-61.
- [3] Груза Г.В., Бардин М.Ю., Ранькова Э. Я. и др. Об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. – М.: Наука, 2001. – С. 18-39.
- [4] Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. – 2003. – Т. 39, № 2. – С. 166-185.
- [5] Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменение климата на азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализа // Опт. атмосф. и океана. – 2006. – Т. 19, № 11. – С. 934-940.
- [6] Кабанов М.В., Лыков В.Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 9. – С. 753-765.
- [7] Киктев Д.Б., Секстон Д.М., Александер Л.В., Фолланд К.К. Тренды в полях годовых экстремумов осадков и приземной температуры во второй половине XX века // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 11. – С. 13-24.
- [8] 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, Спецвыпуск №3. – С. 64-69.
- [9] Современное изменение климата Казахстана. Второе Национальное Сообщение Республики Казахстан по Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата. – <http://www.climatesnc.kz>.
- [10] Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – М.: Изд-во МГУ, 2001.
- [11] Шмакин А.Б., Попова В.В. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 2. – С. 157-166.
- [12] Data documentation for dataset 9290c. Global Synoptic Climatology Network. C: The former USSR. National Climatic Data Center, 2005.
- [13] ERA-40 Project Report Series: The ERA-40 archive. Technical Report, ECMWF, 2004.
- [14] Frich P. et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century // Climate Research. – 2002. – V. 19. – P. 193-212.
- [15] Groisman P., Soja A.J. Ongoing climatic change in Northern Eurasia: justification for expedient research // Environ. Res. Lett. – 2009. – No 4. – doi:10.1088/1748-9326/4/4/045002.
- [16] IDL – Data Visualization Solution. – <http://www.itlvis.com/ProductServices/IDL.aspx>.
- [17] Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1996. – V. 77, No 3. – P. 437-471.
- [18] Kanamitsu M. et al. NCEP-DOE AMIP II Reanalysis (R-2) // American Meteorological Society. – November 2002. – P. 1631-1643.
- [19] Klein T.A. European EUMETNET/WCSN optional programme: Climate Assessment and Dataset (ECA&D), 2007. – http://ecad.knmi.nl/documents/ecad_atbd.pdf.
- [20] Lanzante J.R. Resistant, robust and nonparametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data // Int. J. of Climatology. – 1998. – V. 16, Issue 11. – P. 1197-1226.
- [21] Grid Analysis and Display System. – <http://www.iges.org/grads/>.
- [22] Leptoukh G., Berrick S., Rui H., Liu Z., Zhu T., Shen S. NASA GES DISC on-line visualization and analysis system for gridded remote sensing data// 31th Int. Symposium of Remote Sensing of the Environment (ISRSE), St. Petersburg, Russia, 2005. – <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/392.pdf>.
- [23] NCEP/NCAR Reanalysis. – <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>.
- [24] NOAA-CIRES Twentieth Century Global Reanalysis Version I (1908 – 1958). – <http://dss.ucar.edu/datasets/ds131.0/>.
- [25] Oldenborgh G.J. van, Burgers G. The KNMI climate explorer: a web site to investigate teleconnections and seasonal forecasts, 2005. – <http://www.knmi.nl/publications/showAbstract.php?id=944>.
- [26] Onogi K. et al. The JRA-25 Reanalysis// J. of the Meteorological Society of Japan. – 2007. – V. 85, No 3. – P. 369-432.
- [27] Ross T.F., Manns D.J., Faas W.M., CLIMVIS – a cool way to visualize NOAA's climate data. Preprints. Sixth Symposium on Education, 1997, American Meteorological Society, Boston, MA, J15-J18.
- [28] Sillmann J., Roeckner E. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change // Climate Change. – 2008. – V. 86. – P. 83-104.
- [29] Storch H. von, Zwiers F.W. Statistical analysis in climate research. – Cambridge University Press, 1999.
- [30] Titov A., Gordov E., Okladnikov I., Shulgina T. Web-system for processing and visualization of meteorological data for Siberian environment research

- // Int. J. of Digital Earth. – 2009. – V. 2, Issue S1. – P. 105-119. – doi: 10.1080/17538940902866187.
- [31] Woodward W.A., Gray H.L. Global warning and the problem of testing for trends in time series data // J. of Climate. – 1993. – V. 6. – P. 953-962.
- [32] Zweiers F.W., von Storch H. Taking serial correlation into account in tests of the mean // American Meteorological Society, J. of Climate. – 1995. – V. 8. – P. 336-351.

Computational module of geoinformation web-system for statistical analysis of climatic processes

T. Shulgina, E. Gordov, I. Okladnikov, A. Titov

In this paper developed computational module of geoinformation web-system for analysis of spatially-distributed environmental data series is presented. List of climatic parameters and indicators determining aspects of climate change dynamics is presented. Set of mathematical and statistical procedures for climatic characteristics calculation is collected and partially realized in computational module of geoinformation web-system. On this basis, climate change study over Siberian territory for second half of twenties century was carried out. Reanalysis data and meteorological station observations were used for investigation. Results of long-term trend analysis of air temperature and amount of precipitation show heterogeneous behavior of these meteorological values change over Siberian territory and allow us to determine areas with statistically significant changes.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 10-07-00547), Программ фундаментальных исследований СО РАН (проекты 4.31.1.5 и 4.31.2.7), а также интеграционных проектов СО РАН № 4, 50 и 66