

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВЕННО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Шульгина Т.М.¹, Окладников И.Г.^{1,2}, Титов А.Г.^{1,2}, Гордов Е.П.^{1,2,3}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

²Томский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, Томск

³Томский государственный университет, Томск

E-mail: stm@scert.ru

Аннотация. Представлено прикладное программное обеспечение (ППО) разрабатываемого экспериментального образца веб-ориентированного производственно-исследовательского центра мониторинга и прогноза региональных климатических изменений, реализующее современные концепции Веб 2.0, элементы ГИС-технологий и возможности интернет-доступа к прикладным моделям, наборам геофизических данных и средствам визуализации результатов исследований.

ППО представляет собой программный комплекс, управляемый вычислительным ядром и состоящий из программных модулей для обработки геофизических данных и визуализации результатов.

Ключевые слова: мониторинг изменений климата, информационные системы, региональные климатические изменения.

Введение

Для информационной поддержки интегрированных научных исследований в области наук о Земле, в частности, для комплексного использования изначально разнородных наборов гео-привязанных данных, полученных от разных источников или организаций, необходимо создание программной инфраструктуры, основанной на современных информационно-телекоммуникационных технологиях [1-3]. Систематизированная обработка метеорологических данных различного происхождения с использованием широкого набора апробированных статистических методов обеспечит комплексный подход к задаче исследования и возможность сопоставления получаемых на основе этих данных результатов. Такой подход откроет возможности для углубленного изучения климатических процессов в глобальном и региональном масштабах, нацеленного на выявление особенностей общей динамики и экстремальных явлений регионального климата, определения их влияния на различные экосистемы, в частности, на растительность.

В рамках создания программной инфраструктуры веб-ориентированного производственно-исследовательского центра мониторинга и прогноза региональных климатических изменений «Климат» было разработано прикладное программное обеспечение, состоящее из подсистем обработки геофизических данных и визуализации результатов обработки [4]. Эти подсистемы запускаются и управляются модульным вычислительным ядром, входящим в состав системного программного обеспечения веб-ориентированного производственно-исследовательского центра. В частности, оно предоставляет им программный интерфейс доступа к наборам геофизических данных и передает полученные результаты в подсистемы, реализующие графический интерфейс пользователя.

1. Общее описание прикладного программного обеспечения

В рамках выполнения данной работы были подобраны и реализованы методы обработки и анализа пространственно-привязанных геофизических данных. Поскольку климат определяется, как статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой (атмосфера-океан-суша) за несколько десятилетий [5], корректное описание его динамики возможно только на основе комплексного использования методов вероятностно-статистического аппарата [6, 7]. В частности, в рассмотрение должны быть включены основные статистические характеристики распределений [8] и показатели временной структуры метеорологических рядов [6], отражающие закономерности изменения случайных величин во времени и в пространстве. Важным, в практическом отношении, является получение сведений об экстремальных явлениях и их вероятностных характеристиках [9]. 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 [8]. 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.

После проведенного анализа существующих методов обработки и анализа пространственно-привязанных геофизических данных с целью исследования региональных климатических изменений были выбраны следующие статистические

показатели временной изменчивости величин и частот явлений за выбранный период времени:

- среднее значение метеорологической величины для заданного периода времени (день, неделя, месяц, сезон, год);
- наивысшее и наименьшее значения метеорологической величины в данном месте для заданного периода времени;
- среднеквадратическое отклонение, характеризующее разброс суточных значений относительно средних на протяжении года;
- количество дней в заданное временное интервале со среднесуточной температурой, превышающей фиксированное пороговое значение;
- наступление первого/последнего теплого/холодного дня в году;
- сглаживание скользящим средним, представляющее собой процесс преобразования временного ряда некоторой наблюдаемой метеорологической величины с целью исключения краткопериодических вариаций;
- коэффициент корреляции, характеризующий степень тесноты вероятностной связи между двумя или несколькими переменными величинами (рядами их значений) к функциональной линейной связи;
- коэффициент линейного тренда, оцененный методом наименьших квадратов, характеризующий среднюю скорость изменений изучаемой метеорологической величины;
- линейная регрессия, определяющая статистическую зависимость одной случайной переменной величины от другой.

Кроме того, для расширения набора климатических индикаторов используются индексы изменения климата, рассмотренные и отобранные Группой экспертов по обнаружению, мониторингу и индексам изменения климата Комиссии по климатологии ВМО (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/indices.shtml>). Долговременные наблюдения за климатом выражены через индексы таким образом, что изменения или тренды в рядах усиливаются, что позволяет более раннее и аккуратное выявление изменения климата. Индексы основаны на значениях суточной температуры и суточного количества осадков. Некоторые индексы рассчитываются для фиксированных пороговых значений, связанных с конкретными применениями. В этих случаях пороговые значения одинаковые для всей используемой сети наблюдений. Другие индексы основываются на пороговых значениях, которые варьируют в зависимости от местоположения наблюдательных пунктов. В этих случаях пороговые значения определяются как процентиль соответствующих рядов данных [9].

1.1 Модульная подсистема численной обработки данных

Модульная подсистема численной обработки данных представляет собой программный комплекс, написанный на языке программирования GNU Data Language, который обеспечивает численную обработку геофизических данных. Эти модули работают в тесном контакте с вычислительным ядром, которое использует их для обработки данных согласно полученного задания.

В модульную подсистему численной обработки данных входят:

- *Модуль расчета среднего значения метеовеличины по времени.*

Среднее арифметическое значение метеорологической величины представляет сумму значений временного ряда x_1, x_2, \dots, x_n , деленную на их общее число n [8]:

$$\bar{x} = A_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

Средняя величина выражает наиболее важную информацию о режиме метеорологической величины и удобно для сопоставления метеовеличин во времени и в пространстве.

Модуль обеспечивает вычисление указанной характеристики для любой метеорологической величины и любых пространственных и временных границ.

- *Модуль расчета значения метеорологической величины, усредненной по территории.*

Модуль обеспечивает вычисление среднего по территории значения метеорологической величины:

$$\bar{x} = A_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

где x_1, x_2, \dots, x_n - значения метеорологической величины в каждой из n точек пространства [8].

- *Модуль расчета дисперсии.*

Модуль обеспечивает вычисление дисперсии по следующей расчетной формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 ,$$

где \bar{x} - среднее арифметическое временного ряда (x_1, x_2, \dots, x_n) метеорологической величины [8].

- *Модуль расчета стандартного отклонения.*

Характеристикой изменчивости значений метеорологической величины относительно среднего служит среднеквадратическое отклонение, которое рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где \bar{x} - среднее арифметическое временного ряда (x_1, x_2, \dots, x_n) метеорологической величины [8].

Модуль обеспечивает вычисление характеристики для любой метеорологической величины и любых пространственных и временных границ.

- *Модуль расчета значения абсолютного максимального метеовеличины.*

Модуль позволяет определить наибольшее значение метеорологической величины в заданных временных границах.

$$x_{\max} = \max(x),$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ряд измерений метеорологической величины [8].

- *Модуль расчета значения абсолютного минимума метеовеличины.*

Модуль позволяет определить наименьшее значение метеорологической величины в заданных временных границах

$$x_{\min} = \min(x),$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ряд измерений метеорологической величины [8].

- *Модуль определения минимального значения из ряда максимальных значений метеовеличины.*

Наименьшее значение метеорологической величины внутри ряда, составленного из наибольших значений этой метеорологической величины внутри отдельных временных сегментов. То есть 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 $x_{\min} = \min(x_{\max})$ [9].

- *Модуль определения максимального значения из ряда минимальных значений метеовеличины.*

Наибольшее значение метеорологической величины внутри ряда, составленного из наименьших значений этой метеорологической величины внутри отдельных временных сегментов. То есть 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 $x_{\max} = \max(x_{\min})$ [9].

- *Модуль расчета суточной амплитуды значений метеовеличины.*

Амплитуда колебаний метеорологической величины в заданных временных границах представлена разницей между наибольшим и наименьшим наблюдаемыми значениями этой метеорологической величины в заданных временных пределах.

$$A = \max(x) - \min(x) \text{ [6].}$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ряд измерений метеорологической величины.

- *Модуль расчета количества дней с заморозками.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха. Модуль обеспечивает вычисление годового количества дней с наименьшей суточной температурой воздуха ниже 0°C :

$$\min(T_i) < 0^\circ\text{C},$$

где i – номер суток года [9].

- *Модуль расчета количества жарких дней.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха. Модуль обеспечивает вычисление годового количества дней с максимальной суточной температурой воздуха выше 25°C :

$$\max(T_i) > 25^\circ\text{C},$$

где i – номер суток года [9].

- *Модуль расчета количества морозных дней.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха. Модуль обеспечивает вычисление годового количества дней с максимальной суточной температурой воздуха ниже 0°C :

$$\max(T_i) < 0^\circ\text{C},$$

где i – номер суток года [9].

- *Модуль расчета количества душных ночей.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха. Модуль обеспечивает вычисление годового количества дней с минимальной суточной температурой воздуха выше 20°C , то есть для суток i периода j :

$$\min(T_i) > 20^\circ\text{C},$$

где i – номер суток года [9].

- *Модуль расчета продолжительности вегетационного периода.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха. Модуль предлагает вычисление годового количества дней между

первым интервалом с, по меньшей мере, шестью днями со среднесуточной температурой выше 5 °С и первым интервалом с начала первого июля с, по меньшей мере, шестью днями со среднесуточной температурой ниже 5, 10 °С [9].

- *Модуль расчета показателя суммы эффективных температур.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики приземной температуры воздуха.

Сумма эффективных температур – показатель, пропорциональный количеству тепла, выраженный суммой средних суточных температур воздуха или почвы, уменьшенных на величину температуры 5 °С:

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

где x_{ij} – средняя суточная температура дня i периода j , а n - количество дней, когда x_{ij} превысило пороговое значение в 5 °С, то $\Delta x_{ij} = x_{ij} - 5$ [6].

- *Модуль расчета суммарного количества осадков.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет рассчитать суммарное количество осадков:

$$x = \sum_{i=1}^n x_i, [6].$$

- *Модуль расчета индекса интенсивности осадков.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков.

Интенсивность осадков – показатель, 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 осадками [9].

- *Модуль расчета количества дней с осадками выше заданного значения.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет вычислить количество дней в рамках заданного временного диапазона с осадками выше 10, 20 мм либо другой фиксированной величины:

$$x_i \geq 10, 20, \text{ мм},$$

где x_i суточное количество осадков для i -тых суток года [9].

- *Модуль для определения дня с максимальным количеством осадков.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет определить день в рамках заданного месяца с максимальным количеством осадков:

$$xR1 = \max(x),$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ряд суточных измерений количества осадков для заданного месяца [8].

- *Модуль для определения 5-тидневного периода с максимальным количеством осадков.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет определить пятидневный период в рамках заданного месяца с максимальным количеством осадков:

$$xR5 = \max(x),$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ряд суточных измерений количества осадков для заданного месяца [8].

- *Максимальная продолжительность периода без осадков.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет определить максимальное количество последовательных дней с количеством осадков ниже 1 мм:

$$x_i < 1 \text{ мм},$$

где x_i суточное количество осадков для i -тых суток года [9].

- *Максимальная продолжительность периода с осадками.*

Характеристика предназначена для описания временной динамики количества осадков. Модуль позволяет определить максимальное количество последовательных дней с количеством осадков выше 1 мм:

$$x_i \geq 1 \text{ мм},$$

где x_i суточное количество осадков для i -тых суток года [9].

- *Модуль расчета коэффициентов линейной регрессии.*

Пусть имеем наблюдения по двум величинам $X: x_1, x_2, \dots, x_n$ и $Y: y_1, y_2, \dots, y_n$ и Y имеет линейную регрессию на X , т.е. при заданном X :

$$y = ax + b.$$

При этом a и b – коэффициенты регрессии, неизвестны и должны быть оценены по экспериментальным данным. Оценка неизвестных параметров проводится по методу максимального правдоподобия.

Формулы для коэффициентов регрессии имеют следующий вид:

$$\tilde{a} = \bar{y}, \quad \tilde{b} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2},$$

а ошибка вычисляется по формуле:

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum (y - \tilde{a} - \tilde{b}(x - \bar{x}))^2$$

Доверительные интервалы для параметров a и b имеют вид:

$$\tilde{a} - t_a \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n-2}} < a < \tilde{a} + t_a \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n-2}} \quad \text{и} \quad \tilde{b} - t_b \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n-2} \cdot \sigma} < b < \tilde{b} + t_b \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n-2} \cdot \sigma}$$

где t – симметричный доверительный уровень для распределения Стьюдента с $n-2$ степенями свободы [8].

- *Модуль расчета индекса NDVI по спутниковым данным.*

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:

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

- *Модуль получения изображения в псевдо-естественной цветовой гамме по спутниковым данным.*

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.

- *Модуль расчета коэффициентов корреляции.*

Данный модуль предназначен для считывания из набора геофизических данных и передаче полученного массива без какой-либо обработки. Используется для выборки данных с удаленных дисковых систем хранения данных.

1.2. Модульная подсистема визуализации результатов

Модульная подсистема визуализации результатов представляет собой набор программных модулей, написанных на языке программирования GNU Data Language, которые обеспечивают построение и запись в графические файлы различных полей, диаграмм и графиков, соответствующих полученным результатам обработки и анализа геофизических данных, а также запись их в виде файлов форматов GeoTIFF, EPS, PNG, ЭФТЖ, т. 7, 2012

ESRI Shapefile. Данная подсистема предоставляет программный интерфейс, через который модульное вычислительное ядро передает данные, подлежащие визуализации.

2. Выводы

Разработанное ППО обеспечивает функционирование web-ориентированного производственно-исследовательского центра в области исследования изменений регионального климата. Оно включает в себя две модульные подсистемы: 1) численной обработки результатов моделирования, полученных с использованием различных глобальных и региональных климатических моделей, и данных наземных и спутниковых наблюдений; и 2) визуализации полученных результатов для предоставления их пользователю через веб-интерфейс, что является основной задачей разработанного веб-ориентированного производственно-исследовательского центра.

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки РФ (госконтракт 07.514.11.4044), проектами № IV.31.1.5, № IV.31.2.7, проектами РФФИ (№№ 10-07-00547а, 11-05-01190а), и интеграционным проектом СО РАН № 131.

Литература

1. Frans J. M. van der Wel. Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data. // Meteorol. Appl.–2005.– V.12.–P.7-8.–DOI:10.1017/S1350482704001471.
2. Dragicevic, S., Balram, S., Lewis, J., 2000. The role of Web GIS tools in the environmental modeling and decision-making process. // Abstracts of reports at 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada.–2000.– September 2-8.
3. Шапарев Н. Я., Кадочников А. А., Гостева А. А., Якубайлик О. Э. Проблемы реализации геоинформационной интернет-системы природно-ресурсной тематики // Тр. науч. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».–Красноярск: ИВМ СО РАН.–2003.– Т.1.–С. 244-250.
4. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Богомолов В.Ю., Шульгина Т.М., Генина Е.Ю. Геоинформационная веб-система для исследования региональных природно-климатических изменений и первые результаты ее использования // Оптика аомсферы и океана.– 2012.– Т.25. – № 2. – С. 137-143.

5. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 247 с.
6. Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатологическая обработка метеорологических наблюдений – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 295 с.
7. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии – Изд-во Московского университета, 1989. – 248 с.
8. Storch H. von, Zwiers F.W. Statistical analysis in climate research – Cambridge University Press, Cambridge, 1999. – 484 p.
9. Sillmann J., Roeckner E. Indices for extreme events in projections of antropogenic climate change // Climate Change, 2008. – V. 104. – P. 83–104.