

**Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия  
Центральной Азии (МКВК)**

**Канадское агентство международного развития (СІДА)**

**Университет МакГилл**

**Центр Брейса по управлению водными ресурсами**

# **Изменение климата: что говорит наука**

Публикации Тренингового центра МКВК.  
Выпуск 12

Ташкент 2005

Дорогие читатели!

Предлагаемая вашему вниманию брошюра - двенадцатая в серии «Публикации Тренингового центра МКВК».

Брошюра рассчитана на слушателей Тренингового центра МКВК, специалистов-практиков водного хозяйства, студентов высших учебных заведений соответствующего профиля.

Переводы, представленные в данном сборнике, являются неофициальным.

Составитель **Стулина Г.В.**

**В ВЫПУСКЕ:**

НОВЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЗАСУХИ НА ОСНОВЕ ПОВТОРА ЕЕ ЧАСТОТЫ Дж. Гонзалез, Дж. Валдес .....	4
АНАЛИЗ ЗАСУХИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛУАРИДНОМ РЕГИОНЕ ШТАТА СЕАРА, БРАЗИЛИЯ Ф.С. Дантас Нето, А.А. Соарес, Т.С. Барра, С.С. Медейрос .....	17
МОНИТОРИНГ ЗАСУХИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ SPI В ПРОВИНЦИИ ЯЗД, ИРАН Т. Разии, Б. Сагафьян, А. Шокухи .....	27
АНАЛИЗ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ КАТЕГОРИЯМИ ЗАСУХИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МАРКОВА И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ А. А. Пауло, К. Коэльо, Л. С. Перейра .....	38
АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В. П. Мелешко, В. М. Катцов, В. А. Говоркова, С. П. Малевский-Малевич, Е. Д. Надежина, П. В. Спорышев .....	58

## НОВЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЗАСУХИ НА ОСНОВЕ ПОВТОРА ЕЕ ЧАСТОТЫ<sup>1</sup>

Дж. Гонзалез<sup>2</sup>, Дж. Валдес<sup>3</sup>

### Введение

Засуха связана с очень продолжительными периодами аномально низких уровней водности. Подобные низкие уровни вызваны выпадением малого количества осадков и могут наблюдаться по различным переменным, связанным с водностью. Такими переменными являются осадки (метеорологическая засуха), влажность почвы (сельскохозяйственная засуха) или расход воды (гидрологическая засуха).

Независимо от того, какая переменная выбрана для анализа, в данных определяется отклонение от нормального уровня в сторону понижения. Если продолжительность не учитывается, то засуху можно представить как одномерный предельный случай, подобный другим предельным гидрологическим случаям. Однако случай с засухой представляет собой не только проблему отклонения ниже порога, но имеет значение также время, в течение которого сохраняется это отклонение. Для анализа засухи, определенной как период, когда уровень водности находится ниже порогового, применялась специальная теория. Данный анализ может быть использован для определения вероятности возникновения засухи на основе одной характеристики (например, суммарный дефицит, длительность или средняя интенсивность; Sen, 1976, 1977, 1980; Dracup *et al.*, 1980a, 1980b; Fernandez and Salas, 1999; Chung and Salas, 2000; and Shiau and Shen, 2001), или одновременно двух характеристик (например, длительность и степень «тяжести»; Gonzalez and Valdes, 2003). В этом виде статистической характеристики обычно важно использовать более одной переменной засухи (т.е. длительность, степень «тяжести», интенсивность) для определения вероятности. Другой аспект данного вида подхода - это насколько низким должен быть порог. Это влияет на результат и зависит от ожидаемого поведения анализируемой переменной.

Для управления водными ресурсами (УВР) требуется не только статистическая характеристика исторических данных по засухе, но также мониторинг текущей ситуации на основе гидроклиматических переменных или полученных показателей. Было разработано множество показателей для использования в конкретных целях (Hein, 2000). Кеянташ и Дрекап (2002) оценивают несколько наиболее часто используемых показателей. Большинство из них может применяться только в той местности, где они были определены. Одним из ранее выведенных показателей засухи является Показатель степени «тяжести» засухи Палмера (PDSI; Palmer, 1965). Это эмпирический безразмерный метеорологический показатель, базируемый на количестве осадков и температуре. Другим хорошо из-

<sup>1</sup> 6-я Межрегиональная Конференция по Воде и Окружающей среде «Планирование и управление использованием водных и земельных ресурсов» Альбасете, Испания, 3-5 Сентября 2003г.

<sup>2</sup> Факультет гражданского строительства, университет Castilla – La Mancha, Испания (e-mail: Javier.Gonzalez@uclm.es)

<sup>3</sup> Факультет гражданского строительства и теоретической механики, университет Аризоны, США (e-mail: jvaldes@u.arizona.edu)

вестным показателем является Стандартный показатель осадков (SPI; McKee et al., 1993). Здесь для расчета показателя используется статистическое распределение осадков в рассматриваемый период времени. Значение показателя связано с вероятностью выпадения такого количества осадков, которое ниже наблюдаемой величины.

Ни один из выведенных показателей не является полностью подходящим для общего применения. Все эти показатели сфокусированы на одном или нескольких аспектах засухи и игнорируют множество других факторов. Это является следствием разностороннего характера засухи (т.е. метеорологический, гидрологический, агрономический, социально-экономический характер). Даже когда все показатели необходимо адаптировать к конкретной цели применения, это не означает, что нельзя выработать общую методологию. Ученые всего мира пытаются выработать подобную методологию. В качестве примера можно привести американскую программу мониторинга засухи (NOAA/National Climatic Data Center), а в Европе исследования подобные ARIDE и необходимость в развитии показателя засухи для УВР, отмеченную в Европейской Рамочной Директиве по водным ресурсам (200/60/CE).

В данной статье показана новая общая методология расчета Средней частоты повтора (MFR) предельного случая, рассматриваемого как многомерный во времени. Данный случай представлен последовательностью экстремумов  $w$  и таким образом размерность случая равна его длительности. Для MFR аналитически было выведено выражение с предположением независимости от времени, и затем оно было приблизительно подсчитано. MFR (или его инверсия - Период возврата) представляет собой полезный инструмент для анализа и мониторинга засухи. Показатель частоты засухи (DFI), базирующийся на этих результатах, описывает историческое событие или текущую ситуацию, наблюдаемую с помощью гидроклиматической переменной (например, осадки, влажность почвы, расход воды, уровень подземных вод) в соответствии с ассоциированной вероятностью или MFR. Методология использует непосредственно последовательность значений этой переменной и поэтому неявно учитывает все возможные аспекты, которые могут быть рассмотрены (т.е. длительность, степень «тяжести», интенсивность, минимум). Ожидается, что новый показатель засухи оценит все характеристики предельного случая и резюмирует их в одно значение. Его эффективность продемонстрирована на ряде примеров в Техасском климатическом отделе 5, США и Гибралтаре. Результаты сопоставлены с показателем Палмера и SPI. Статистическая природа DFI обосновывает его правильность при сопоставлении показателя, рассчитанного в разных районах. Он может применяться не только для анализа засухи, но также и для изучения экстремальных природных явлений.

## Методология

Для ознакомления с методологией приведем простой пример. Будем анализировать проблему характеристики чрезвычайного периода, рассматривая непрерывные переменные и два события с временным шагом ( $x_1, x_2$ ). Переменная в каждый временной шаг считается независимой. Допуская, например, стандартное нормальное распределение для вероятностной функции переменной (т.е.  $x \in N(\mu=0, \sigma=1)$ ), имеем двумерную плотность распределения вероятности,

показанную на рис. 1. Кривые одинаковой плотности представлены окружностями с центром в начале координат. Реализация пар переменных  $(X_1, X_2)$  вероятнее всего будет ближе к середине  $(0,0)$  с уменьшением вероятности, по мере того как они удаляются от начала координат.

Приемлемым способом для учета отклонения от стандарта события  $(X_1, X_2)$  может быть рассмотрение расстояния от начала координат. Взяв квадрат радиуса  $R^2$ , как показано в уравнении (1), экстремальное свойство события может быть охарактеризовано вероятностью возникновения случаев с  $r^2 \geq R^2$ . Такая вероятность является дополняющей интегральной вероятности  $r^2$ , определенной как  $F(R^2) = P[r^2 < R^2]$ .

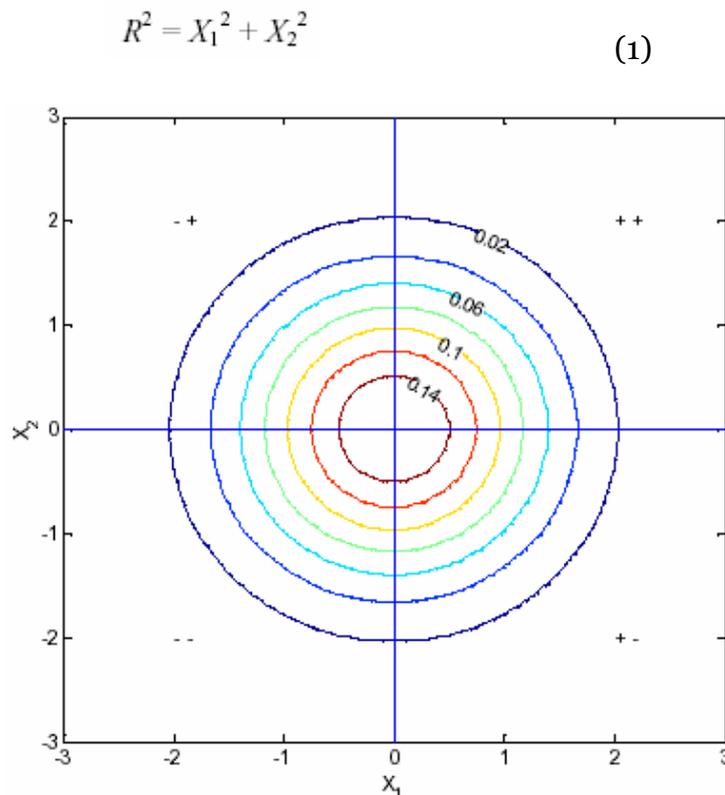


Рис. 1. Контурные линии стандартизованной бинормальной функции плотности

Эта характеристика имеет, по крайней мере, один недостаток для ее применения в анализе засухи. Этот метод не различает позитив, негатив или смешивает знаки, предельные случаи. Например, на рисунке 1 точки с одинаковым значением  $r$  и содержащиеся в первом и втором квадрантах одинаково учитываются. Однако с точки зрения характеристики засухи эти две точки не производят один и тот же эффект. Другой пример - это когда длина периода больше двух и небольшая положительная величина возникает между отрицательными предельными величинами. Здесь потребуется ассоциировать дополнительную вероятность с возникшей комбинацией знаков. Однако такая дополнительная вероятность не позволяет выполнить полную желаемую характеристику. Если разделить величину и знаки, то появится разрыв между ближайшими случаями, т.е. случаями с компонентом  $X_i$  близким к нулю, но с различным знаком в каждом случае. Поэтому даже когда данный метод анализирует отклонения от

стандарта, он не является наиболее подходящей процедурой для анализа засухи. Он вычисляет только абсолютную величину. В качестве полюса используется середина или начало координат (0,0). Случаи, подобные засухе, должны изучаться как случаи, отклоняющиеся в одном конкретном направлении. В случае двух переменных ( $X_t, X_{t+1}$ ), полюсом должен быть  $(-\infty, -\infty)$  и отклонение в сторону этого полюса должно быть количественно определено. Без потери применимости к засухе, с настоящего времени проблема будет обсуждаться в общей форме, допуская в качестве абсолютного положительный полюс  $(+\infty, +\infty)$ . Общая процедура для анализа этого отклонения выполняется путем определения вероятности возникновения случаев с переменными, которые больше или равны наблюдаемым величинам. Для случая двухтактного периода эта вероятность определяется как  $\ell(X_1, X_2) = P[x_1 \geq X_1 \cap x_2 \geq X_2]$ .

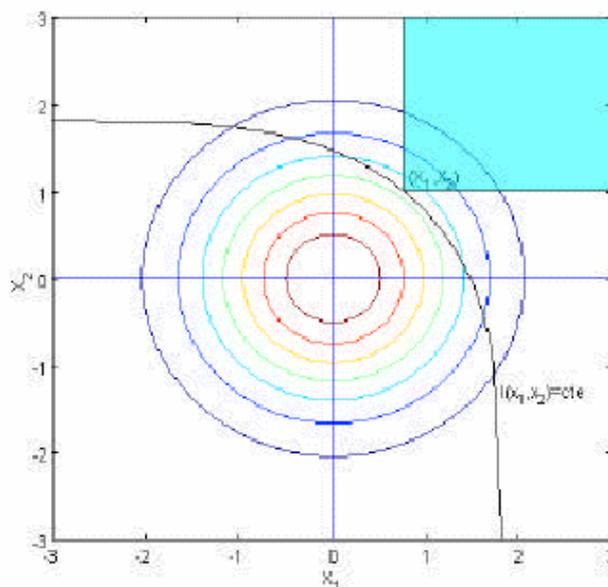


Рис.2. Функция  $\ell$  для точки  $(X_1, X_2)$ , определенная как вероятность событий  $(x_1, x_2)$  с  $(x_1 \geq X_1 \cap x_2 \geq X_2)$

Определяя случаи большие или равные  $(X_1, X_2)$  как случаи с  $x_1 \geq X_1 \cap x_2 \geq X_2$  (закрашенный участок на рис. 2), все случаи со значением  $x_1$  меньшим  $X_1$  считаются вне множества. Однако есть точки, где  $x_1 < X_1$  и  $x_2 > X_2$ , которые имеют одинаковую или большую  $\ell(x_1, x_2)$ . С практической точки зрения желательно рассмотреть множество предельных случаев, которые больше или равны  $(X_1, X_2)$  как точки с  $\ell(x_1, x_2) \geq \ell(X_1, X_2)$ .

Таким образом, предельные случаи одинаковой длины могут быть сопоставлены по величине  $\ell$  или по вероятности случаев с  $\ell(x_1, x_2)$  меньшей, чем  $\ell(X_1, X_2)$  (т.е.  $P[(x_1, x_2) / \ell(x_1, x_2) < \ell(X_1, X_2)]$ ).

Данная формулировка позволяет избежать проблемы со знаками, которые возникали в предыдущем подходе. Функция имеет желаемое свойство непрерывности в полном ряде значений, поскольку знаки всегда зависят от случайно определенного начала отсчета.

Для практичности данного подхода необходимо дополнительно учесть следующее. Функция  $\ell$  может быть использована для сопоставления случаев одинаковой продолжительности. Но как мы можем сопоставить случаи с разными по продолжительности периодами? Решение не является прямым, поскольку значения  $\ell$ , получающиеся от разных по продолжительности периодов, не могут быть сопоставлены напрямую. Причина заключается в том, что подобные вероятности выводятся из полей вероятностей разных размерностей и поэтому они не могут сопоставляться. Данным подходом предлагается сравнивать случаи с разной продолжительностью посредством анализа ассоциированной характеристики большей доли в анализе предельных случаев. В этом случае главное свойство, которое определяет степень предельности события, это Средняя частота повтора (MFR) или его инверсия, Период возврата. При вычислении MFR событий с разными по продолжительности периодами все вероятности от пространств, различных по размерности, выражаются в одном масштабе. MFR или Период возврата могут использоваться для сопоставления событий разной длительности. Далее описывается метод вычисления MFR событий любой продолжительности, допуская независимость переменных в каждый момент времени.

### Расчет MFR событий с продолжительностью $W$

На множестве  $X_1, X_2, \dots, X_w$  реализаций  $w$  случайной переменной  $x$ , с плотностью распределения вероятности  $f(x)$ , и функцией суммарной плотности  $F(x)$ , функция  $\ell(X_1, X_2, \dots, X_w)$  определяется как вероятность событий с  $x_i \geq X_i$ , для  $i=1, 2, \dots, w$ .

$$\ell(X_1, X_2, \dots, X_w) = P[(x_1, x_2, \dots, x_w) / x_i \geq X_i, i=1, 2, \dots, w] \quad (2)$$

Допуская независимость между реализациями,  $\ell$  может быть вычислена как:

$$\ell(X_1, X_2, \dots, X_w) = \prod_{i=1}^w (1 - F(X_i)) \quad (3)$$

$\ell(x_1, x_2, \dots, x_w) = \alpha$ , где  $\alpha$  - константа, определяет поверхность в пространстве  $R^w$ . Определяя  $X_c = F^{-1}(1 - \alpha)$ , из (3) следует, что на этой поверхности  $x_i$  стремится к  $X_c$ ,  $x_i \rightarrow X_c$ , когда оставшиеся элементы стремятся к  $-\infty$ ,  $x_j \rightarrow -\infty$  для всех  $j \neq i$  (при  $x_j \rightarrow -\infty \forall j \neq i$ ,  $\ell(x_1, x_2, \dots, x_w) \rightarrow 1 - F(x_i)$ ). Поэтому на данной поверхности значения каждого элемента  $x_i$  представлены рядом  $(-\infty, X_c)$ . Поверхность  $\ell(x_1, x_2, \dots, x_w) = \alpha$  обозначим через  $\ell_w(X_c)$ .

$\ell_w(X_c)$  определяет границы объема, для которого  $\ell(x_1, x_2, \dots, x_w) < \alpha = 1 - F(X_c)$ . Этот объем в пространстве  $\nabla^w$  обозначается как  $L_w$  и определяется  $X_c$ , или что то же самое  $\alpha$ , как в (4).

$$L_w(X_c) = \{(x_1, x_2, \dots, x_w) / \ell(x_1, x_2, \dots, x_w) < (1 - F(X_c))\} \quad (4)$$

В объеме  $L_w(X_c)$  каждый элемент изменяется в пределах  $(-\infty, X_c)$ . Когда  $k < w$  и элементы  $(X_1, X_2, \dots, X_k)$  с  $\ell(X_1, X_2, \dots, X_w) < (1 - F(X_c))$  постоянные, остающиеся элементы точек в  $L_w(X_c)$  в пространстве  $\nabla^w$  лежат в суженном интервале  $(-\infty, H(X_c; X_1, X_2, \dots, X_k))$ , где  $H(X_c; X_1, X_2, \dots, X_k)$  определяется следующим образом:

$$H(X_c; X_1, X_2, \dots, X_k) = F^{-1} \left( 1 - \frac{1 - F(X_c)}{\prod_{i=1}^k (1 - F(X_i))} \right) \quad (5)$$

Вероятность возникновения случаев  $(x_1, x_2, \dots, x_w)$ , принадлежащих  $L_w(X_c)$  определяется как  $P[L_w(X_c)] = P[(x_1, x_2, \dots, x_w) \in L_w(X_c)]$ , и ее вычисление исходит из интегрирования плотности распределения вероятности по  $L_w(X_c)$ :

$$P[L_w(X_c)] = \int_{L_w(X_c)} \prod_{i=1}^w f(s_i) \cdot dV \quad (6)$$

где  $dV$  - дифференциал объема в пространстве  $\nabla^w$ . Поскольку предполагается независимость, то плотность распределения вероятностей в точке  $(x_1, x_2, \dots, x_w)$  равна интегральному результату всех простых плотностей распределения вероятностей,  $f(x_i)$ . Этот интеграл с использованием функций  $H$  может быть записан как:

$$P[L_w(X_c)] = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_w) \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; s_w)} f(s_{w-1}) \cdot \dots \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; s_w, s_{w-1}, \dots, s_2)} f(s_1) \cdot ds_1 \cdot \dots \cdot ds_{w-1} \cdot ds_w \quad (7)$$

Однако основной интерес заключен в ассоциированной MFR событий, принадлежащих  $L_w(X_c)$  для фиксированного  $X_c$ , чем в вероятности  $L_w(X_c)$ . Для ее расчета допустим, что  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$  является множеством последовательных реализаций случайной переменной  $x$ . После новой реализации наблюдается  $x_n$ , определим  $p_n$  как условную вероятность, что множество последних  $w$  реализаций (т.е.,  $x_{n-w+1}, x_{n-w+2}, \dots, x_n$ ) принадлежит  $L_w(X_c)$ , при условии, что все предыдущее множество последовательных  $w$  реализаций (т.е.,  $x_{i-w+1}, x_{i-w+2}, \dots, x_i$ ;  $i = w, w+1, \dots, n-1$ ) тоже принадлежит  $L_w(X_c)$ .

$$p_n = P[(x_{n-w+1}, x_{n-w+2}, \dots, x_n) \in L_w(X_c) / (x_{i-w+1}, x_{i-w+2}, \dots, x_i) \in L_w(X_c), i = w, w+1, \dots, n-1] \quad (8)$$

По мере увеличения  $n$ ,  $p_n$  стремится к постоянной величине, которая представляет вероятность возникновения события -  $w$  (т.е., множество последовательных  $w$  реализаций), принадлежащего  $L_w(X_c)$ , при условии, что предыдущие события -  $w$  также принадлежат  $L_w(X_c)$ . Детализация в обратном направлении во времени этих ранних событий должно учитываться, с практической точки зре-

ния, так как будто влияние предыдущих реализаций имеет незначительное влияние на  $p_n$ . При подобной практической точки зрения, по мере увеличения  $n$  дополнительная  $q_n=1-p_n$  стремится к средней частоте повтора (MFR) событий- $w$ , больших или равных  $l_w(X_c)$ , допуская, что предыдущие события- $w$  были меньше. Кроме того, период повтора событий- $w$ , больших или равных  $l_w(X_c)$ , после достаточного количества реализаций событий- $w$  меньших  $l_w(X_c)$ , равен  $1/q_n$ , с достаточно большим значением  $n$ .

Поэтому для определения MFR или периода возврата событий- $w$ , больших или равных  $l_w(X_c)$  требуется вычислить условные вероятности. Оценка  $p_n$  выглядит следующим образом:

1. После первой реализации,  $x_1$ , невозможно изучить какое-либо событие- $w$ , но поскольку  $x_1$  должно принадлежать множеству  $(x_1, x_2, \dots, x_w) \in L_w(X_c)$ , то  $x_1 \in (-\infty, X_c)$ . Поэтому  $p_1 = F(X_c)$  и условная плотность распределения вероятностей  $x_1$  задается выражением (9).

$$f_1(x_1) = f(x_1)/p_1 \quad (9)$$

2. Во время второй реализации,  $x_2$ , множество  $(x_1, x_2)$  должно быть внутри события- $w$ , принадлежащего  $L_w(X_c)$ . Если  $w=2$ , то  $(x_1, x_2) \in L_w(X_c)$ . Когда  $w>2$ , оставшиеся элементы  $(x_3, x_4, \dots, x_w)$  являются все еще не определенными и известно только, что они лежат в интервале  $(-\infty, X_c)$ . Исходя из этого, при  $x_i \rightarrow \infty$ ,  $i=3, 4, \dots, w$ , по крайней мере  $(x_1, x_2)$  должны принадлежать  $L_2(X_c)$ . Поэтому даже для  $w>2$ ,  $(x_1, x_2) \in L_2(X_c)$  условная вероятность описывается формулой (10).

$$p_2 = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_2) \int_{-\infty}^{H(X_c; S_1)} f_1(s_1) ds_1 ds_2 \quad (10)$$

Из (9) следует, что:

$$p_1 \cdot p_2 = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_2) \int_{-\infty}^{H(X_c; S_2)} f(s_1) ds_1 ds_2 \quad (11)$$

3. Используя то же рассуждение, для  $n \leq w$  следует, что

$$p_n = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_n) \int_{-\infty}^{H(X_c; S_n)} f_{n-1}(s_{n-1}) \cdot \dots \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; S_n, S_{n-1}, \dots, S_2)} f_1(s_1) ds_1 \cdot \dots \cdot ds_{n-1} ds_n \quad (12)$$

при этом  $f_i(x_i) = f(x_i)/p_i$   $i=1, 2, \dots, n-1$ , и поэтому

$$\prod_{i=1}^n p_i = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_n) \int_{-\infty}^{H(X_c; S_n)} f(s_{n-1}) \cdot \dots \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; S_n, S_{n-1}, \dots, S_2)} f_1(s_1) ds_1 \cdot \dots \cdot ds_{n-1} ds_n \quad (13)$$

4. Когда  $n=w+1$ , условная вероятность  $p_{w+1}$  задается (14).

$p_{w+1} =$

$$\int_{-\infty}^{X_c} f(s_{w+1}) \int_{-\infty}^{H(X_c; S_{w+1})} f_w(s_w) \cdot \dots \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; S_{w+1}, S_w, \dots, S_3)} f_2(s_2) \cdot \int_{-\infty}^{H(X_c; S_w, S_{w-1}, \dots, S_2)} f_1(s_1) ds_1 \cdot ds_2 \cdot \dots \cdot ds_w ds_{w+1} \quad (14)$$

Определяя функцию

$$G_I(s_w, s_{w-1}, \dots, s_2) = \int_{-\infty}^{H(X_c; s_w, s_{w-1}, \dots, s_2)} f(s_1) ds_1 \quad (15)$$

получим

$$\prod_{i=1}^n p_i = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_{w+1}) \int_{-\infty}^{H(X_c; s_{w+1})} f(s_w) \dots \int_{-\infty}^{H(X_c; s_{w+1}, s_w, \dots, s_3)} f(s_2) \cdot G_I(s_w, s_{w-1}, \dots, s_2) \cdot ds_2 \dots ds_w ds_{w+1} \quad (16)$$

5. Для  $n > w + 1$  и принимая во внимание рекуррентное выражение

$$G_I(s_{i+w-1}, s_{i+w-2}, \dots, s_{i+1}) = \int_{-\infty}^{H(X_c; s_{i+w-1}, s_{i+w-2}, \dots, s_{i+1})} f(s_i) \cdot G_I(s_{i+w-2}, s_{i+w-3}, \dots, s_i) \cdot ds_i \quad (17)$$

имеем

$$\prod_{i=1}^n p_i = \int_{-\infty}^{X_c} f(s_n) \int_{-\infty}^{H(X_c; s_n)} f(s_{n-1}) \dots \int_{-\infty}^{H(X_c; s_n, s_{n-1}, \dots, s_{n-w+21})} f(s_{n-w+1}) \cdot G_{n-w}(s_n, s_{n-1}, \dots, s_{n-w+1}) \cdot ds_{n-w+1} \dots ds_{n-1} ds_n \quad (18)$$

Исходя из выражений (17) и (18) и обозначая  $P_n$  как

$$P_n = \prod_{i=1}^n p_i$$

$p_n$  может быть вычислено путем деления  $P_n$  на  $P_{n-1}$ .

Вычисление  $p_n$  состоит из большого числа интегралов, особенно для больших  $w$ . Для многих плотностей распределения вероятностей,  $f(x)$ , эти интегралы не имеют аналитического решения (например, нормальное распределение) и необходимо применять численные методы для приближения решения. Поскольку это многостадийный процесс, необходимо уделить внимание контролю распространения ошибок. Более того, даже при небольших ошибках это может ограничить применение, так как характеристика вероятности предельных случаев чрезвычайно чувствительна к округлению ошибок. Ниже представлено преобразование, которое облегчает выполнение серии интегральных операций при улучшении контроля над численными ошибками.

Определим преобразование  $x$  в новую переменную  $v$  уравнением (20).

$$v = -Ln(1 - F(x)) \quad (20)$$

При этом преобразовании, когда  $x \rightarrow -\infty$  и  $v \rightarrow 0$  и когда  $x \rightarrow X_c$ ,  $v \rightarrow V_c = -Ln(1 - F(X_c))$ . Функция  $\ell(x_1, x_2, \dots, x_w)$ , записанная через  $v_i$  имеет более простую форму

$$\ell(x_1, x_2, \dots, x_w) = e^{-\sum_{i=1}^w v_i} \quad (21)$$

Поэтому поверхность, определенная формами  $\ell_w(V_c)$ , через  $v$ , это район плоскости

$v_1 + v_2 + \dots + v_w = v_c$ , при  $v_i > 0$  для  $i = 1, 2, \dots, w$ . Объем, определенный  $L_w(V_c)$  теперь принимает форму многогранника, границы которого определяются  $\ell_w(V_c)$  и плоскостями  $v_i = 0$  для  $i = 1, 2, \dots, w$ . Функция  $H$ , используемая для задания границ интегрирования элементов точки, принадлежащей  $L_w(V_c)$  после фиксирования нескольких элементов (5), теперь может быть выражена в виде

$$H(V_c; v_1, v_2, \dots, v_k) = V_c - \sum_{i=1}^k v_i \quad (22)$$

Для вычисления интегралов требуется преобразования Якобиана. Из (20)

$$\frac{dv}{dx} = \frac{f(x)}{1 - F(x)} = \frac{f(v)}{e^{-v}} \quad (23)$$

Таким образом, функция Якобиана выражается в виде

$$J(v) = \frac{dx}{dv} = \frac{e^{-v}}{f(v)} \quad (24)$$

Это позволяет записать интегралы в более простой форме. Например, вероятность  $L_w(V_c)$ , уравнение (7), теперь принимает следующую форму

$$P[L_w(V_c)] = \int_0^{V_c} f(v_w) \cdot \int_0^{V_c - v_w} f(v_{w-1}) \cdot \dots \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=2}^w v_i} f(v_1) \cdot J(v_1) \cdot dv_1 \cdot \dots \cdot J(v_{w-1}) \cdot dv_{w-1} \cdot J(v_w) \cdot dv_w \quad (25)$$

Из (24) и (25) следует, что

$$P[L_w(V_c)] = \int_0^{V_c} e^{-v_w} \cdot \int_0^{V_c - v_w} e^{-v_{w-1}} \cdot \dots \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=2}^w v_i} e^{-v_1} \cdot dv_1 \cdot \dots \cdot dv_{w-1} \cdot dv_w \quad (26)$$

$$P[L_w(V_c)] = 1 - \left( \sum_{i=1}^w \frac{V_c^i}{i!} \right) \cdot e^{-V_c} \quad (27)$$

Этот результат не зависит от функции распределения, используемой для  $x$ , и единственная роль подобного распределения заключена в расчете  $V_c$ . Ниже приведена последовательность вычисления  $p_n$  после подобного преобразования:

$$p_l = 1 - e^{-V_c} \quad (28)$$

$$P_n = \prod_{i=1}^n p_i = \int_0^{V_c} e^{-v_n} \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=0}^n v_i} e^{-v_{n-1}} \cdot \dots \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=2}^n v_i} e^{-v_1} \cdot dv_1 \cdot \dots \cdot dv_{n-1} \cdot dv_n$$

для  $n=2, \dots, w$  (28)

$$G_1(v_w, v_{w-1}, \dots, v_2) = \int_0^{V_c - \sum_{i=2}^w v_i} e^{-v_1} \cdot dv_1$$

(29)

$$G_i(v_{i+w-1}, v_{i+w-2}, \dots, v_{i+1}) = \int_0^{V_c - \sum_{j=i+1}^{i+w-1} v_j} e^{-v_i} \cdot G_{i-1}(v_{i+w-2}, v_{i+w-3}, \dots, v_i) \cdot dv_i$$

для  $i > 1$  (30)

$$P_n = \int_0^{V_c} e^{-v_n} \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=0}^n v_i} e^{-v_{n-1}} \cdot \dots \cdot \int_0^{V_c - \sum_{i=n-w+2}^n v_i} e^{-v_{n-w+1}} \cdot G_{n-w}(v_{n-1}, v_{n-2}, \dots, v_{n-w+1}) \cdot dv_{n-w+1} \cdot \dots \cdot dv_{n-1} \cdot dv_n$$

для  $n > w$  (31)

Исходя из данного преобразования, аналитическое выражение  $P_n$  может быть вычислено и можно оценить  $p_n$  для различных значений  $n$ , изучая его сходимость. Однако число членов в этом аналитическом решении быстро растет по мере роста  $n$  или  $w$ . Выражение  $P_n$  имеет общий вид

$$P_n = 1 + \sum_{j=1}^n q_j(V_c) \cdot e^{-jV_c}$$

(32)

где  $q_j(V_c)$  при  $j=1, 2, \dots, n$  - полиномы и функция  $V_c$ . Для значений  $V_c$  больших, чем постоянное  $e$ , члены в суммировании, связанные с крупными индексами (т.е.,  $j$ ) можно игнорировать по сравнению с первыми индексами. Таким образом, можно получить хорошее приближение к точному решению путем округления в последовательности интегралов результатов к первым членам  $m$ . Ошибка приближения зависит от  $m$ :

$$P_n \approx 1 + \sum_{j=1}^m q_j(V_c) \cdot e^{-jV_c}$$

при  $m < n$  (33)

Другой аспект расчета  $P_n$  заключается в том, что по мере роста  $n$  коэффициенты в полиномах  $q_j(V_c)$  становятся больше. Для  $V_c$  меньшего, чем рассматриваемое значение  $\epsilon$ , ошибки округления, связанные с вычислением (31) или (32) получают больший или такой же порядок величины, что и точное решение. Значение  $\epsilon$ , определяющее границы ряда, к которому относятся ошибки округления, увеличивается вместе с  $n$ . Поэтому необходимо быть осторожными с максимальным значением  $n$ , принимаемым во избежание расхождения.

## Приближенное решение MFR событий с продолжительностью $W$

Используя технику округления, можно рассчитать приближение к функции, которая связывает условную вероятность  $p$  с  $V_c$ , для заданного  $w$ . Эта функция имеет дробную форму, где как числитель, так и знаменатель представляют суммирование членов.

$$p_w = A_w(V_c)/B_w(V_c) \quad (34)$$

$A_w(V_c)$  и  $B_w(V_c)$  могут быть выражены в матричной форме. Например, при  $w=2$  и уровне округления  $m=5$ ,  $p_{w=2}$  приближается следующим

$$A_{w=2}(V_c) = [1 \ V_c \ V_c^2 \ V_c^3 \ V_c^4 \ V_c^5] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 7 & 19 & 21 & -6 & -42 \\ 0 & -9 & -42 & -65 & -24 & 14 \\ 0 & 0 & 49/2 & 125/2 & 36 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -125/6 & -18 & -2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 27/8 & 1/8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/120 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-V_c} \\ e^{-2V_c} \\ e^{-3V_c} \\ e^{-4V_c} \\ e^{-5V_c} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B_{w=2}(V_c) = [1 \ V_c \ V_c^2 \ V_c^3 \ V_c^4 \ V_c^5] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 6 & 13 & 8 & -14 & -14 \\ 0 & -8 & -30 & -32 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18 & 32 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -32/3 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-V_c} \\ e^{-2V_c} \\ e^{-3V_c} \\ e^{-4V_c} \\ e^{-5V_c} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Функция  $p_w$  строится для значений  $w$  от 2 до 8. Для заданного  $p$ , по мере роста  $w$  значение  $V_c$ , которое дает то же  $p$ , также увеличивается. Кривые являются гладко вогнутыми. Это обеспечивает интерполяции по  $w$ , поэтому не требуется вычислять все функции  $p_w$ .

Из условных вероятностей  $p_w$ , их дополняющая  $q_w=1-p_w$  является средней частотой повтора (MFR), а обратное  $1/q_w$  представляет Период возврата подобных событий.

Важный итог данной работы состоит в том, что эти результаты являются непараметрическими. Статистическое распределение переменной  $x$  играет роль только в преобразовании  $X_c$  к  $V_c$ .

## Вычисление MFR событий произвольной длительности

Вышеприведенные результаты приводят вычисление MFR события с фиксированной длительностью. Два события различной длительности,  $w_1$  и  $w_2$ , и равными MFR (или безусловной вероятностью  $p_w$ ) событий фиксированной длительности, как вычислялось выше, являются равнозначно предельными. MFR событий равнозначно предельных возрастает, когда вместо рассмотрения событий только с длительностью  $w$  рассматриваются события произвольной дли-

тельности с одинаковыми MFR (т.е. MFR, рассчитанными для фиксированной длительности,  $p_{w1} = p_{w2}$ ). Поэтому следующий шаг состоит в определении MFR всех событий равнозначно предельных, даже когда они имеют разную длительность.

Аналитический расчет этой новой безусловной вероятности невозможен с практической точки зрения. Метод Монте-Карло позволяет аппроксимировать отношение между  $p_w$  и значением  $p$ , рассматривая все длительности. Детали вычисления не приводятся, поскольку неуместны для окончательного практического применения. Важен результат, который связывает безусловные вероятности со следующим выражением:

$$p = 1 - (1 - p_w)^\beta \quad (37)$$

### Применение показателя частоты засухи

Техника, описанная выше, может применяться для характеристики засухи через среднюю частоту повтора (MFR). Могут быть охарактеризованы как исторические случаи, так и фактическая ситуация. Показатель выражает степень редкости возникновения события или ситуации на основе статистически нормального поведения.

Вначале мы представим, как охарактеризовать рассматриваемую ситуацию. Теоретический сигнал придерживается стандартного нормального распределения и в это время завершает период неизменных низких величин. Различные длительности могут быть проанализированы в это время для характеристики текущей ситуации. Значения  $p$  для длительностей от 1 до 8 временного шага показаны ниже; все периоды завершаются на временном шаге 8. Кроме того, представлены MFR,  $q$ , и период возврата ( $T$ ). Когда анализируются последние два или три параметра,  $T$  возрастает, особенно для  $w=3$ . Сюда входит предельный период низких значений, которые все еще доминируют в это время. По мере роста  $w$ ,  $T$  уменьшается, поскольку поведение сигнала становится более нормальным. Поэтому для характеристики ситуации во временном шаге 8, с точки зрения периода низких предельных значений, естественным путем будет соотношение большего Периода возврата, наблюдаемого в данном временном шаге. В этом случае значение  $T=21$  и это будет значением Показателя частоты засухи (DFI), который будет характеризовать ситуацию в данном временном шаге. Это соответствует идее, что засуха представляет собой не только предельно низкие величины сигнала водообеспеченности, но, кроме того, необходимо принимать во внимание продолжительность. Продолжительность анализируется с помощью Периода возврата для нахождения наиболее экстремального периода.

Вышеприведенная процедура характеризует ситуацию в фиксированный момент времени, DFI приводится к равенству с наибольшим значением  $T$  тех периодов, которые заканчиваются в этот момент. Характеризация подобным способом в каждый момент во временном ряду дает представление колебаний степени засушливости. В качестве примера дается применение DFI к ежегодному количеству осадков в Техасском климатическом отделе (Texas Climatic Division 5). Показатель характеризует степень предельной засушливости каждый год. Крупная засуха имела место в 30-х, 50-х годах 20 века и в текущий период. Также представлен результат применения показателя засухи Палмера, PDSI. Поведение показателя Палмера, по-видимому, совершенно аналогично пред-

ставлению ежегодных осадков. Это слабое место показателя, поскольку ожидается влияние продолжительности на показатель засухи. Однако показатель PDSI не изменяется в предельно засушливые периоды, такие как 30-е и 50-е годы, удерживаясь только в пределах низких величин, как осадки. Однако по мере роста продолжительности DFI также повышается.

Исходя из этих результатов, исторические события могут быть охарактеризованы посредством ассоциирования с более высоким DFI, получаемым в данный период. Таким образом, засуха в 50-х имела Период возврата 1000 лет, а в 1930-х - 125 лет. Для случая засухи 1950-х Период возврата имеет тот же порядок величины, что и период, рассчитанный Гонзалесом и Валдесом (2003), в этом случае, полученного из двумерного статистического анализа засухи с использованием PDSI (T=700 лет). Для случая засухи 1930-х Период возврата из DFI существенно возрастает (T=44 лет). Тем не менее, относительное увеличение ожидается, поскольку DFI рассчитывает Период возврата с большей степенью свободы.

Для сопоставления работы показателя с SPI используется пример наблюдения осадков в Гибралтаре (на юго-западном побережье Пиренейского полуострова).

DFI показывает три сильные засухи, одна около 1870 года с периодом возврата 65 лет, другая около 1950 года с периодом возврата 20 лет и последняя в конце периода контроля с периодом возврата 90 лет. Изменчивость режима осадков меньше, чем в Техасе, фактически в Техасе климат полуаридный, в отличие от Гибралтара.

SPI представляет распределение суммарного периода осадков. SPI, примененный к осадкам Гибралтара, указывает также на наличие трех значительных засушливых периодов, когда анализируется последний 48-месячный период. Однако с SPI продолжительные засухи требуют длительного суммарного периода: засуха 1870 г. длилась более 4-х лет, поэтому 48-месячный SPI разбивает эту засуху на два события. Распределение дефицита на событие, используя SPI, необходимо анализировать, изучая различные графики. Основное преимущество DFI над SPI состоит в том, что DFI содержит в одной уникальной кривой всю эту информацию, учитывая все характеристики, такие как длительность, степень тяжести или распределение дефицита. Кроме того, DFI имеет физическое значение: период возврата, который дает прямое понимание об исключительности данного события.

## **Заключение**

Предлагаемый подход для вычисления MFR многомерных во времени событий позволяет на практике использовать эту концепцию в характеристике засухи. Данный подход требует условия независимости участвующих переменных, но он не зависит от распределения вероятности переменной. Применение концепции MFR многомерных событий в характеристике засухи и формулировка DFI имеет преимущество рассмотрения засухи через вероятность и в то же время включает все аспекты события: длительность, степень тяжести, максимальная интенсивность и т.д. Характер вероятности DFI обосновывает правильность его применения при сравнении засухи в различных районах и при различных климатах. Это дает преимущество над любыми другими показателями, которые не базируются на статистических характеристиках.

Основное преимущество относительно SPI, который также базируется на статистических концепциях, заключается в том, что он включает длительность в анализ и не требует ее параллельного анализа, в отличие от SPI. Более того DFI может применяться к любой интересующей гидроклиматической переменной, не только к осадкам. DFI позволяет представлять главные характеристики засухи в виде одной величины, на основе стохастического свойства явления и средней частоты повтора.

Подход полезен не только для характеристики засухи, но также для любого другого анализа опасных природных явлений, проявляющихся как экстремальное отклонение от нормального состояния переменной при некоторой протяженности во времени или пространстве (например, наводнения). Кроме того, его можно использовать для мониторинга состояния системы управления водными ресурсами, анализируя осадки, речной сток, подпитку водоносных горизонтов, влажность почвы и т. д.

## **АНАЛИЗ ЗАСУХИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛУАРИДНОМ РЕГИОНЕ ШТАТА СЕАРА, БРАЗИЛИЯ<sup>4</sup>**

**Ф.С. Дантас Нето, А.А. Соарес, Т.С. Барра, С.С. Медейрос**

### **Резюме**

Определение и характеристика засухи имеют большое значение для планирования водных ресурсов.

На северо-востоке Бразилии полуаридные регионы особенно подвержены засухе. Эти исследования проводились с целью установить характеристику режима осадков, а также проанализировать временные изменения в Центральном полуаридном регионе штата Сеара, Бразилия. Показатель степени засухи Пальмера (PDSI) использован для характеристики интенсивности засухи и установления корреляции с феноменом «Эль Ниньо». Из 742 мм среднегодовых осадков 90 % выпадает в первой половине года с марта по апрель, что указывает на высокую временную изменчивость (46 %) и различную внутригодовую интенсивность засухи в регионе. В первой половине года преобладает умеренная и сильная засуха, а во второй половине – степень засухи снижается до легкой засушливости. Между явлениями «Эль Ниньо» и засухи корреляционные связи очень низкие. Этот анализ может быть полезным для планирования стратегических программ борьбы с засухой в Центральном регионе штата Сеара.

### **Введение**

---

<sup>4</sup> 6-я Межрегиональная конференция по воде и окружающей среде «Планирование и управление использованием водных и земельных ресурсов» Альбасете, Испания, 3-5 сентября 2003 г.

Засуха является предметом серьезной озабоченности человека с древних времен и даже сейчас она является выдающимся примером бессилия человека перед крупномасштабными и ужасными явлениями природы. Засуха воздействует как на поверхностные, так и на подземные воды, истощая их запасы и приводит к потере урожая сельхозкультур, а следовательно, к отрицательным экономическим и социальным последствиям. На северо-востоке Бразилии засуха регистрируется с более высокой частотой по сравнению с другими полуаридными регионами, где среднемноголетнее количество выпадающих осадков гораздо меньше эвапотранспирации, что негативно влияет на все виды экономической и социальной активности, заставляя ускорять социально-экономическое развитие этих регионов. Социально-экономическая засуха устанавливает отношения между засухой и человеческой деятельностью, освещая воздействия и уязвимость по отношению к засухе ввиду неадекватной практики обработки почвы. Характеристики дождевого режима штата Сеара, расположенного в полуаридной зоне, сезонная и временная изменчивость зависит от проникновения фронтальных систем (Kousky, 1979), завихрений в верхних слоях тропосферы (Kousky & Gan, 1981) и колебаний от 30 до 60 дней (Kayano et al., 1990). Согласно Nobre & Molion (1988), межтропическая зона конвергенции ответственна за выпадение дождей в штате Сеара.

Засуха может быть охарактеризована сравнением между текущими осадками и нормальными осадками за период времени в определенном месте. Palmer (1965) предложил определение засухи, положив в основу время, в течение которого содержание почвенной влаги в определенном месте остается ниже нормального уровня, формируя климатические условия, адаптированные для характеристики метеорологической засухи.

Для характеристики засухи приняты некоторые процедуры. Обычно при изучении засухи пользуются показателями засухи, которые состоят из уравнений с основанием из климатических переменных, и статистическими процедурами для определения интенсивности, продолжительности и частоты этого аномального явления. Эти процедуры использовались для характеристики засухи в северо-восточном регионе Бразилии (Xavier & Xavier, 1984; Kumar et al., 1989; Lima et al., 1989; Repelli & Nobre, 1991; Azevedo & Silva, 1994). Пальмер (Palmer, 1965) разработал показатель степени засухи (PDSI) на основании ежемесячного гидравлического баланса, который был использован в США. Этот показатель используют в Австралии (Kothavala, 1997), Европе (Briffa et al., 1994), Канаде (Akinremi et al., 1996) и Бразилии (Assis et al., 1997). Недавно PDSI был использован в глобальных климатических моделях для моделирования степени засухи в Австралии (Kothavala, 1999) и в северном полушарии (Jones et al., 1996).

Охлаждение и нагревание восточной и западной частей тропического региона влияют на давление на уровне моря. Эти две системы связаны, то есть, когда в восточной зоне высокое давление, то в западной – низкое и наоборот. Южный показатель колебаний (SOI) представляет разницу атмосферного давления между островами Таити и Дарвин. Положительные значения SOI ассоциируются с феноменом «Ла Нинья», тогда как отрицательные значения ассоциируются с «Эль Ниньо».

Некоторые исследования указывают на влияние «Эль Ниньо» на осадки. Фонтана и Берлато (Fontana & Berlato, 1997) выяснили, что это влияние, особенно в октябре-ноябре, проявляется на западе штата Рио Гранде-до-Сул. Пишиотано

(Pisciottano et al., 1994) выявил сильное влияние «Эль Ниньо» на временное и пространственное распределение осадков.

По данным Orokui-Ankomah & Cordery (1994), изменения температуры моря (SST) могут служить основой ценной информации о режиме осадков в данном месте. Эти же авторы выявили высокий уровень корреляции между температурой воды Атлантического океана и общим объемом осадков за сезон дождей в Гане, Африка. Chu (1995) упоминает, что в годы, следующие за явлением «Эль Ниньо», имела место высокая изменчивость режима осадков.

Это исследование имело целью охарактеризовать режим осадков и проанализировать временную изменчивость засухи в Центральном регионе штата Сеара, а также оценить уровень корреляции между PDSI и «Эль Ниньо».

## **Материалы и Методы**

### ***Площадь исследований и данные***

Центральный регион штата Сеара расположен северо-восточной части Бразилии. В этой части преобладает неорошаемое земледелие, которое в большой степени зависит от режима осадков и условий засухи. Многолетние наблюдения за осадками насчитывают 75 лет. Для расчета климатического водного баланса были использованы месячные данные об осадках и температуре. Эти данные были представлены SUDENE (Северо-восточное Управление Развития) и FUNCEME (Фонд Метеорологических и Гидрологических Исследований штата Сеара).

### ***Расчет Показателя степени засухи***

В настоящем исследовании для определения начала засухи и оценки ее степени используется показатель Палмера (PDSI; Palmer, 1965; Alley, 1984; Karl, 1986). В некоторых случаях используется показатель аномальной влажности Z, пропорциональный месячной величине PDSI.

Процедура расчета DSI включает осадки, эвапотранспирацию и влажность почвы, которые определяют гидрологическую и сельскохозяйственную засуху.

### ***Гидрологический баланс***

Расчет показателя PSDI начинается с климатического водного баланса с использованием многолетних среднемесячных данных о температуре и осадках. Эмпирическая процедура использована для учета запасов почвенной влаги, разделив почву на два произвольных слоя. Верхний слой пусть содержит 25 мм полевой влагоемкости. Потери из подстилающего слоя зависят от первоначальной влажности, а также от потенциальной эвапотранспирации ( $ET_0$ ) и водоотдачи (AWC) почвенной системы. Кроме  $ET_0$  используются еще три термина, определяемые следующим образом: Потенциальное восполнение (PR) – количество воды, требуемое для приведения почвы к полной влагоемкости. Потенциальные потери (PL) – количество воды, теряемое почвой на эвапотранспирацию в течение периода отсутствия осадков. Потенциальный сток (PRO) определяется как разница между осадками и испарением.

### ***Климатические коэффициенты***

Завершается моделированием водного баланса для периода наличия метеоданных. Ежемесячные коэффициенты рассчитываются как соотношение между ре-

альными и потенциальными климатическими среднемесячными величинами испарения, стока и потерь, соответственно.

### **Значения SAFEC**

Расчетные коэффициенты используются для определения количества осадков, требуемого для SAFEC, т.е. «нормальной» погоды в каждом отдельном месяце.

### *Показатель аномальной влажности*

Разница между реальными и потенциальными (SAFEC) осадками является показателем дефицита или избытка воды, так что месяц на исследуемой площади выражается как  $D=P-\square$ . Эти отправные точки трансформируются в показатель аномальной влажности  $Z=ki D$ , где  $ki$  является весовым фактором для месяца  $I$ , который учитывает также пространственную изменчивость отправных точек ( $D$ ).

### *Показатель засухи*

Временные ряды показателя  $Z$  анализируются для выработки критериев начала и окончания засухи и формулы для определения ее степени. Для определения степени засухи используется следующее эмпирическое выражение:

$$PDSI_i = PDSI_{i-1} + Z_i/3 - 0,103 PDSI_{i-1} \quad (1)$$

где  $Z_i$  – показатель аномальной влажности, а  $i$  представляет  $i$ -месяц. Классы погоды с использованием показателя Пальмера PDSI (1965) как перехода от -4 (крайняя степень засухи) до +4 (крайняя степень влажности), приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Классификация значений PDSI**

<b>PDSI</b>	<b>Классификация</b>
более 4.00	Крайне влажный
3.00-3.99	Очень влажный
2.00-2.99	Умеренно влажный
1.00-1.99	Слегка влажный
0.99-(-0.99)	Близкий к нормальному
-1.00-(-1.99)	Слегка сухой
-2.00-(-2.99)	Умеренно сухой
-3.00-(-3.99)	Очень сухой
менее 4.00	Крайне сухой

### **Показатель южного колебания (SOI)**

В данном исследовании использовали показатель Tronp Soi Index, который представляет собой аномалию разницы давлений на уровне моря между островами Таити и Дарвин и рассчитывается из уравнения (2).

$$SOI = 10 \frac{P_{dif} - P_{difm}}{DP_{Pdif}} \quad (2)$$

где  $P_{dif}$  - разница давлений на уровне моря между островами Таити и Дарвин;  $P_{difm}$  - есть средняя величина  $P_{dif}$  - для исторического периода, а  $DP_{Pdif}$  есть стандартное отклонение  $P_{dif}$ .

### **Показатель температуры поверхности моря (SST)**

Этот показатель представлен Климатическим прогнозным центром (NOAA-CIRES) в Боулдере, Колорадо. Эти данные относятся к аномальным среднемесячным величинам на поверхности моря за период с 1856 по 1991 гг.

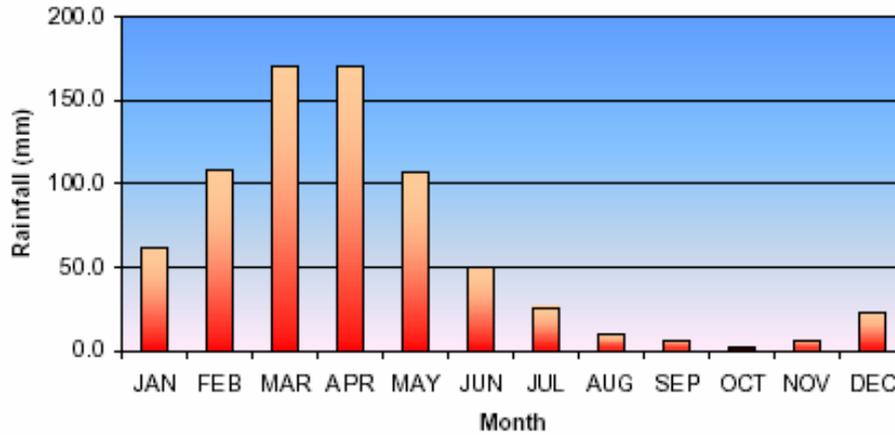
## **Результаты и обсуждение**

### **Характеристика режима выпадения осадков**

Распределение осадков в Центральном регионе штата Сеара характеризуется высокой внутригодовой и межгодовой изменчивостью. Осадки колеблются в пределах от 691,1 до 789,9 мм, представляя площадь с малым количеством осадков в штате Сеара. Было обнаружено, что режим выпадения осадков показывает высокую концентрацию во время сезона дождей, то есть в первой половине года, что составляет 90,1 % среднегодового количества осадков. Что касается режима осадков для разных частей региона, то они хорошо коррелируются с коэффициентами корреляции до 0,75, показывая, что явление сухого и влажного сезонов в регионе коррелируются.

Рисунок 1 иллюстрирует эволюцию среднемесячной величины осадков в Центральном регионе штата Сеара. Можно проверить, что март и апрель являются наиболее дождливыми со средней величиной осадков 171,3 и 171,0 мм. Осадки, выпадающие в течение этих месяцев, составляют 46 % от суммарных годовых осадков.

В мае отмечается существенное снижение количества осадков, а в июне оно составляет всего 7 % от среднегодового, характеризуя засушливый период, который длится до января, когда осадки вновь достигают 62 мм. Месяцы с августа по ноябрь - самые засушливые с количеством осадков менее 10 мм.

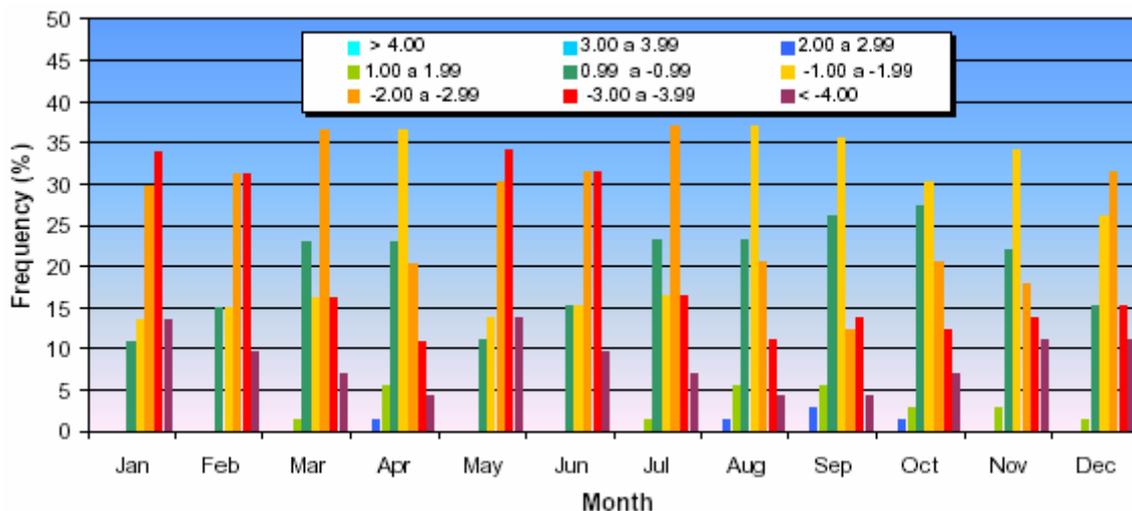


**Рис. 1. Среднемесячное количество дождевых осадков в Центральном регионе штата Сеара**

### **Временная изменчивость PDSI**

Для анализа PDSI в Центральном регионе штата Сеара была выбрана местность Квиксерамобим, как представительная в отношении средних климатических условий в регионе, поскольку режим осадков между различными местностями хорошо коррелируется. На рис. 2 иллюстрируется распределение месячной частоты PDSI в местности Квиксерамобим. Допуская начало сухого сезона с величин PDSI

Между  $-2,00$  и  $-2,99$  (умеренная засуха), было отмечено, что более свирепая засуха отмечена в мае (34,2 % относительной частоты), за которой следует умеренная засуха (30,1 % относительной частоты). Такая ситуация сохраняется до августа, когда более часто имеет место умеренная засуха, за которой следуют почти нормальные условия. Тем не менее, с августа по ноябрь свирепость засухи снижается, переходя в легкую ее форму.



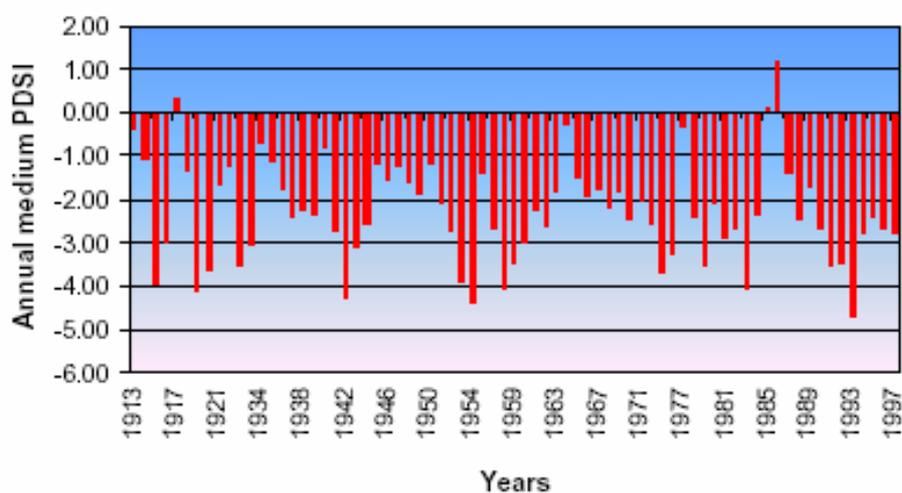
**Рис. 2. Гистограмма относительной частоты PDSI в местности Квиксерамобим**

Начало сезона дождей в местности Квиксерамобим характеризуется большой изменчивостью. В марте и апреле, самые дождливые месяцы года, превалирует умеренная и слабая засуха, соответственно. Возможно, наличие дождей в марте вносит положительный вклад в восстановление запасов влаги и снижение степени засухи в апреле.

### **Внутригодовая изменчивость PDSI**

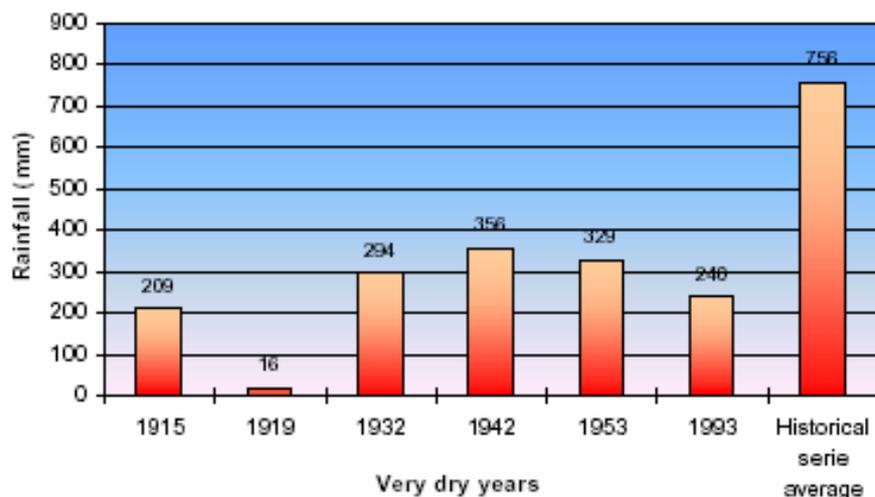
Рисунок 3 иллюстрирует изменчивость PDSI за период наблюдений для местности Квиксерамобим.

Наблюдения показывают, что в многолетнем плане доминирует свирепая засуха. Этот результат обнаруживает потенциал использования такого показателя степени засухи как PDSI, что позволяет более объективно оценить воздействия засухи, чем при простом анализе осадков.

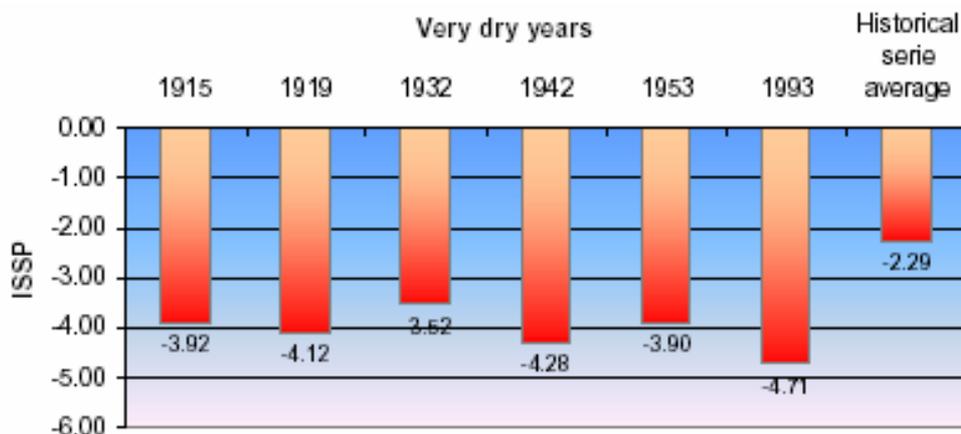


**Рис.3. Среднегодовое значение PDSI для местности Квиксерамобим**

В изучаемом периоде можно выделить несколько очень засушливых лет в местности Квиксерамобим., что иллюстрируется рисунками 4 и 5. Обнаружено, что в эти годы осадки составляли лишь 25 % от среднеегодовой величины.



**Рис. 4. Ежегодные осадки в годы, классифицированные как засушливые в соответствии с величиной PDSI в местности Квиксерамобим**



**Рис. 5. Значения PDSI, наблюдаемые в годы, классифицированные как засушливые для местности Квиксерамобим**

### **Соотношение между значениями PDSI, осадками, SST и SOI**

Корреляционные связи между PDSI и температурой поверхности моря, а также показателем южного колебания были очень низкими, особенно с показателем. Эти результаты не свидетельствовали о влиянии температуры и показателя колебаний на показатель Палмера. Следовательно, прямая связь между явлением засухи и феноменом «Эль Ниньо» не существует.

### **Заключение**

Осадки в Центральном регионе штата Сеара концентрируются в первой половине года (март, апрель), составляя 90,1 % от суммарных среднегодовых осадков; отмечена высокая степень корреляции между режимом осадков в различных местностях Центрального региона; режим подвержен высокой временной изменчивости (около 46 %). В первой половине года доминирует сильная засуха до умеренной, во второй половине года превалирует мягкая засуха; корреляци-

онные связи между явлением засухи и феноменом «Эль Ниньо», засвидетельствованные PDSI, низкие.

### Публикации

- Akinremi, O.O., Mcginn, S.M., barr, A.G. Evaluation of the Palmer Drought Index on the Canadian Praires // *Journal of Climate*. – 1996. – Vol.9, no. 5. - P. 897-905.
- Alley, W.M. The Palmer drought severity index: limitations and Assumptions // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. – 1984. - Vol. 23, no. 7. - P. 1100-1109.
- Assis, F.N., Martins, S.R., Mendez, M.E.G. Índice de severidade de seca de Palmer no RioGrande do Sul. // *Congresso Brasileiro De Agrometeorologia*, 10, 1997. Anais... - Piracicaba, SP: SBMET, 1997. - P. 383-385.
- Azevedo, P.V., Silva, V.P.R. Índice de seca de Bhalme e Mooley: uma adaptação regional - // *Congresso Brasileiro De Meteorologia*, 3, 1994. Anais... - Belo Horizonte, MG: SBMET, 1994. - P. 696-699.
- Brabo, J.M., repelli, C.A., Mello, N.S. A pré-estação chuvosa do setor norte do Nordeste e a sua relação com a temperatura dos oceanos Adjacentes // *Revista Brasileira de Meteorologia*. – 1993 - Vol. 1, no. 8. - P. 22-30.
- Briffa, K., Jones, P., Hulme, M. Summer moisture availability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer drought severity index // *Int. J. of Climatology* - 1994. - No.14. - P. 457-506.
- Chu, P.S. Hawaii rainfall anomalies and El Niño. // *Journal of Climate*, v.8, n.5, p.1697-1703, 1995.
- Fontana, D.C., Berlato, M.A. Influência do El Niño oscilação sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. // *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.1, p.127-132, 1997.
- Jones, P., Hulme, M., Briffa, K., Jones, C., Mitchell, J., Murphy, J. Summer moisture availability over Europe in the hadley Center General Circulation model based on the Plamer drought severity index. // *Int. J. of Climatology*, n.16, p.155-172, 1996.
- Karl, T.R. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. // *J. Climate Appl. Meteor.*, v.25, no 1, p. 77-86, 1986.
- Kayano, M.T., Kousky, V.E., Studzinski, C.M., Dias, P.L.S. As variações intrasazonais da precipitação no Brasil durante o verão de 1988/1990. // *Climanálise*, no.5, p. 40-50, 1990.
- Kousky, V.E. Frontal influences on Northeast Brasil. // *Mon. Wea. Rev.*, v.107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.
- Kousky, V.E., Gan, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. // *Tellus*, no. 33, p. 538-551, 1981.
- Kothavala, Z. The duration and severity of drought over eastern Australia simulated by a coupled ocean-atmosphere GCM with a transient increase in CO<sub>2</sub>. // *Enviromental Modelling and Software*, n. 14, p. 243-252, 1999.
- Kumar, K.K., Siva, J.A.T., Silva, B.B. Estudo de seca e aridez em Fortaleza-CE. // In: *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, 6, 1989, Maceió, AL. Anais... Maceió-AL: SBAGRO, p. 175-184, 1989.
- Lima, M.C., Santos, R.C., Moraes, J.C. Estudo de secas no Estado de Alagoas. // In: *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, 4, 1989, Maceió, AL: SBAGRO. Anais... Maceió-AL, p. 160-169, 1989.

- Nobre, C.A., Molion, L.C. The climatology of droughts and drought predictions. // In: Parry, M.L., Carter, T.T., Koijn, N.T. The impact of climate variations on agriculture. - Dordrecht, Netherlands: KluwerAcademic, v.2, p. 115-134, 1988.
- Opoku-Ankomah, Y., Cordery, I. Atlantic sea surface temperatures and rainfall variability in Ghana. // Journal of Climate, v.7, n. 4, p. 551-558, 1994.
- Palmer, W.C. Meteorological drought. Washington, DC: U.S. Weather Bureau. 1965. 65p.
- Pisciottano, Diaz, A., Cazes, G., Mechoso, C.R. El Niño-Southern oscillation impact on rainfall in Uruguay. // Journal of Climate, v.7, n. 8, p. 1286-1302, 1994.
- Repelli, C.A., Nobre, C.A. Um novo índice de anomalia de precipitação para o Nordeste do Brasil. // In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 7, 1991, Viçosa, MG. Anais... Viçosa-MG: SBAGRO, p. 21-25, 1991.
- xavier, T.M.B.S., Xavier, A.F.S. Classificação de anos secos e chuvosos na Região Nordeste do Brasil e sua distribuição espacial. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 3, 1984, Belo Horizonte, MG. Anais..., Belo Horizonte-MG: SBMET, p. 267-275, 1984.

## МОНИТОРИНГ ЗАСУХИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ SPI В ПРОВИНЦИИ ЯЗД, ИРАН<sup>5</sup>

Т. Рази<sup>6</sup>, Б. Сагафьян<sup>7</sup>, А. Шокухи<sup>8</sup>

### Резюме

Засуха, будучи природным явлением и неотъемлемой частью изменчивости климата, часто наносит ущерб засушливым и полузасушливым регионам Ирана. Существует много показателей, применяемых для исследования различных природных явлений. Многие из этих показателей требуют переменных, которые в большей части Ирана не регистрируются. Показатель SPI, основанный только на осадках, является отличным и удобным для применения показателем для разделения засушливых и дождливых периодов. Ежемесячные данные по осадкам с 15 дождемерных станций в центральных частях Ирана вместе с соответствующими историческими данными были использованы для расчета показателя SPI с целью проведения мониторинга в провинции Язд. Месячные данные по осадкам со всех станций были адаптированы к функции гамма-распределения и интегральной функции распределения (CDF) каждой станции, были взяты и преобразованы в стандартную CDF.

Используя данный метод, были рассчитаны значения SPI ряда данных для любой заданной станции, а также были определены засушливые и дождливые периоды на каждой станции. Значения SPI в засуху декабря 1998 года для 5 временных масштабов были изображены на карте с использованием ГИС и геостатистических методов. Результаты показали, что значения SPI придерживались приблизительно одинаковой формы во всех временных масштабах. Значения SPI снижаются по направлению к востоку и, следовательно, степень тяжести засухи возрастает в восточной части провинции, которая испытывает различные степени засухи: от сильной до крайне сильной.

**Ключевые слова:** Засуха, Мониторинг, SPI, Иран

### Введение

Засуха – это природное явление и неотъемлемая часть изменчивости климата. Она также является присущей, нормальной, периодически повторяющейся особенностью климата (Wilhite 1997, Lesley and Dupigny-Giroux, 2001). Засухи случаются повсюду и вызывают интенсивную нехватку воды, однако их свойства значительно различаются из региона в регион (Baren, 1985). Анализ засухи часто ограничивается описательной оценкой (Dupigny-Giroux, 2001). Характеристики и последствия засух могут изменяться в разных климатических режимах по всему миру. В чувствительных засушливых регионах дефицит осадков ин-

<sup>5</sup> 6<sup>th</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water «Land and Water Use Planning and Management» Albacete, Spain, September 3-5, 2003

<sup>6</sup> Климатолог-исследователь, НИИ Охраны Почв и Управления Водосбором (SCWMRI), Тегеран и доктор философии климатологии, Университет Тегерана, Иран. E mail: [tayebrazi@scwmri.ac.ir](mailto:tayebrazi@scwmri.ac.ir)

<sup>7</sup> Доцент, SCWMRI, Тегеран, Иран. E mail: [Saghafian@scwmri.ac.ir](mailto:Saghafian@scwmri.ac.ir)

<sup>8</sup> Доцент, Международный Университет Имама Хомейни, Казвин, Иран

тенсивно влияет на водные ресурсы и, во многих случаях, метеорологические засухи влекут за собой гидрологические и экологические засухи.

Засуха отличается от засушливости, которая используется для описания климата регионов с малым количеством осадков и рассматривается как постоянная особенность климата. Засухи – это коварные экстремальные гидрологические и климатологические явления, которые отрицательно воздействуют на социальную, экономическую, культурную и другие функции региона в течение временных засушливых периодов. Возникновение жестокой засухи, особенно той, что длится несколько сезонов или несколько лет подряд, часто приводит к серьезным экономическим, экологическим и социальным последствиям (Wilhite 1997).

Существует несколько классификаций засухи среди различных дисциплин. Популярная и принятая во всем мире дисциплинарная перспективная классификация разделяет засухи на метеорологическую, гидрологическую, сельскохозяйственную и социо-экономическую (Dracup et al., 1980a). *Метеорологической* засухой считается, когда годовое количество осадков меньше, чем многолетнее среднегодовое количество осадков. Если метеорологическая засуха продолжается долгое время, она порождает *гидрологическую* засуху характерную сокращением руслового стока и запасов подземных вод. *Сельскохозяйственная* засуха происходит, когда водообеспеченность почвы для сельхозкультур сокращается до уровня, при котором возникают отрицательные воздействия на урожай зерна и, как следствие, сельскохозяйственное производство в регионе (Kumar and Panu 1997, Dracup et al 1980a).

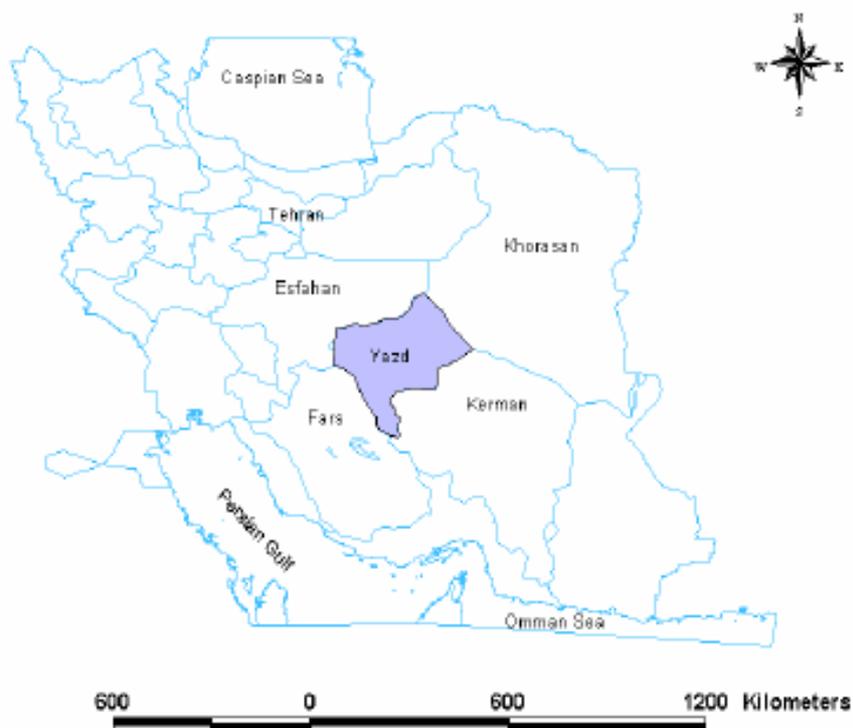
Наконец, *социо-экономическая* засуха сопровождается долгим периодом метеорологической и/или гидрологической засухи, которая влияет на человеческие жизни и вызывает голод и интенсивную миграцию. Мониторинг засухи является ключевым фактором управления засухой и рисками, особенно в регионе, подверженном засухе. Это явление, признанное одним из крупных экологических рисков, привлекло внимание специалистов по проблемам окружающей среды, экологов, гидрологов, метеорологов и т.п. Было совершено множество попыток проведения анализа и мониторинга засухи. Дрейкап – один из тех пионеров, которые определили характеристику и признаки засухи (Dracup et al 1980b). По его убеждению, явление засухи должно состоять из трех определяющих признаков, таких как Продолжительность (D), Степень тяжести (S) и Масштаб (M). Анализ частоты засух с точки зрения продолжительности, степени тяжести и масштаба сложен, поскольку каждый из этих параметров может обладать собственным распределением вероятностей (Dracup et al. 1980b, Lee et al. 1986).

Чтобы выполнить анализ засухи, необходим показатель точного определения влажных и засушливых периодов. Многие исследователи предлагали несколько показателей засухи. Среди таких показателей самые распространенные – это Показатель засухи Бальме и Мули, BMDI (Bhalme & Mooley 1980), Показатель влаги культуры, CMI (Palmer, 1968), Децили (Gibbs and Maher 1967), Показатель степени тяжести засухи Палмера, PDSI (Palmer 1965), Процент соответствия, PN (Willke et al. 1994), Показатель регенерации после засухи, RDI (Weghorst 1996), Стандартизированный показатель осадков, SPI (Makee et al. 1993, 1995), Показатель поверхностных водных ресурсов, SWSI (Shafer and Dezman 1982), из них PDSI и SPI используются во всем мире. Натаниэль и Гутман (1998 г.) сравнили индекс PDI, старая версия показателя PDSI, с показателем SPI через спектраль-

ный анализ, чтобы оценить точность их применения. Согласно результатам спектрального анализа PDI по определению является авторегрессивным первого порядка, а показатель SPI, для периодов дольше месяца, является по определению процессом скользящего среднего. Результаты показали, что за периоды менее одного года PDI отстает от SPI, а за периоды больше одного года, в фазе находятся два показателя. Пространственное сопоставление спектров показало устойчивую форму для SPI, но несколько разных форм для PDI. Следовательно, интерпретация SPI может считаться одинаковой в любой местности. Отсутствие пространственного постоянства PDI означает, что показатель, вероятно, не представляет одинаковые свойства в любой местности и, следовательно, не должен быть использован для сопоставления условий в разных местах. Как указывают Натаниэль и Гутман (1998 г.), показатель SPI рекомендуется как показатель засухи, поскольку он прост, пространственно стабилен и, вероятностный в собственной интерпретации, так что его можно использовать в анализах риска и решения, а также подогнать под периоды времени, которые представляют интерес для пользователей. Напротив, PDI очень сложен, пространственно нестабилен, труден для понимания и привязан ко времени. Хотя большая часть литературы рекомендует SPI для проведения пространственного мониторинга засухи, во всем мире общество пользователей, чтобы признать этот показатель, будет ждать достижения соглашения по распределению вероятностей для моделей, адаптированным к данным об осадках (Nathaniel and Guttman, 1998). Эта статья рассказывает о применении показателя SPI в центральном засушливом и полузасушливом регионах Ирана.

### **Область исследования**

Провинция Язд расположена в центре Ирана, географически ограничена 29°50' и 33° 28' северной широты и 52°51' до 56°41' западной долготы. Рисунок 1 показывает географическое положение Язда в Иране. В климате области большую часть года преобладает субтропический антициклон. Это явление влечет за собой жаркий и сухой климат летом. Осадки в провинции Язд вырабатываются Средиземноморскими синоптическими системами, которые передвигаются на восток вместе с западными ветрами в холодное время года. Синоптические системы и изменение из года в год ряда проходящих циклонов приводят к высокой изменчивости годовых осадков. Благодаря длинной траектории и потере влаги, достигая региона, эти системы не приносят существенных осадков. Среднегодовые осадки за регистрируемый период на станции Язд составили 63 мм. В основном, осадки выпадают в холодное время года, особенно в январе, феврале и марте. Средняя максимальная температура достигает 45°C летом.



**Рис. 1. Географическое положение провинции Язд в Иране**

Из-за высокой температуры и недостатка влажности воздуха годовая эвапотранспирация тоже очень высокая. Эта ситуация приводит к дефициту воды в регионе. Таким образом, мониторинг и управление засухой очень важно в подобном регионе.

### **Методы и применение**

Метеорологическая засуха была определена с использованием ежемесячных данных по осадкам, собранных 15 дождемерными станциями на протяжении, по меньшей мере, 20 лет. По причине недостатка станций с соответствующими многолетними данными было решено использовать станции с многолетней записью в близлежащих провинциях. Поэтому мы расширили зону исследования до некоторых частей провинций Хорасан, Исфахан, Фарс и Керман. Данные были проверены на ошибки и неоднородность, а недостающие данные определялись с соседних станций посредством регрессионных методов. Продолжительность записи данных на каждой станции отличается. Станции Язд и Исфахан имеют самые продолжительные записи с 1951 по 1998 годы, а некоторые записи начинаются с 1960 года. Для того чтобы получить стабильные результаты, мы продлили длину регистрации данных, производя данные для станций не более 35 лет, используя регрессионный метод.

Показатель SPI был выбран для мониторинга коротких периодов засухи в провинции Язд. Этот показатель был впервые предложен Макки в 1993 году (Mckee et al. 1993, 1995). SPI - относительно простой, круглогодичный показатель, применяемый в исследованиях запасов воды. SPI основан только на осадках. Его преимущество заключается в том, что его можно рассчитать для различных временных масштабов. Эта многосторонность позволяет SPI проводить мони-

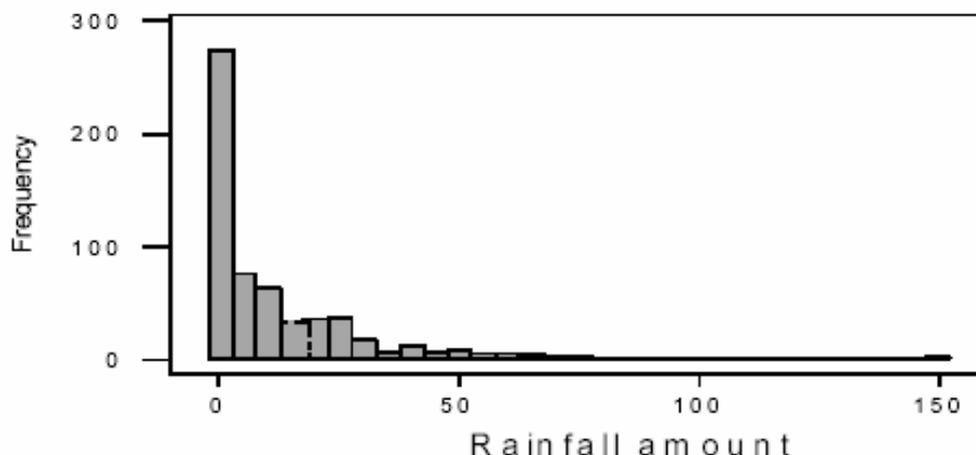
торинг краткосрочных запасов воды, таких как почвенная влага, важная для сельскохозяйственного производства, и многолетних водных ресурсов, таких как подземные запасы воды, русловой сток, озеро и уровень водохранилища (Hayes et al. 1999). Характер SPI позволяет аналитику определить раритет засухи или аномально влагообильного явления в особом временном масштабе для любой местности в мире, где регистрируются осадки. Климатический центр Колорадо, Западный региональный климатический центр и Национальный центр по смягчению проблем засухи используют SPI для мониторинга засухи в Соединенных Штатах. Некоторые страны мира – Турция, Бразилия, Мексика, Коста-Рика, Аргентина, Чили, Венгрия, ЮАР - и европейские страны также применяют показатель SPI для мониторинга периодов засухи и дождей. Расчет SPI для конкретного периода времени в любом месте требует многолетней базы ежемесячных данных по осадкам за 30 или более лет. Функция распределения вероятности (PDF) определяется на основе многолетней записи путем подгона функции к данным. Интегральная функция распределения (CDF) затем преобразуется в функцию нормального распределения с использованием равной вероятности при среднем нулевом значении и нормальном единичном отклонении, таким образом, значения SPI действительно имеют нормальные отклонения (Hayes et al. 1999). Многие специалисты и исследователи убеждены, что лучшая PDF для адаптации месячных данных по осадкам особенно к засушливым и полузасушливым регионам – это функции семейств гамма. Определение SPI включает адаптацию PDF гамма к заданному распределению частоты выпадения общего количества осадков для станции. Затем определяются параметры PDF для данных каждой станции, определенного временного масштаба и каждого месяца года. После этого вычисляется CDF и преобразуется в стандартную CDF с целью определения SPI.

### Результаты

В засушливых и полузасушливых регионах, таких как большая часть Ирана, наиболее часто выпадающие количества осадков имеют малые значения. В таких регионах годовое количество осадков может выпасть за несколько дней холодного сезона, и поэтому большая часть года остается без осадков. Таким образом, многие месяцы в году завершаются нулевыми значениями. Как показано на рис. 2, гистограммы ряда месячных данных исследуемых станций возникли при почти нулевых частотах и высоких значениях данных.

В результате большие величины в правой области больших отклонений не компенсируются соответственно низкими величинами в левой области и, следовательно, среднее арифметическое значение будет больше медианы. С другой стороны, существование множества нулевых значений уменьшает среднее арифметическое значение ряда данных и делает невозможным использование арифметических Z-величин, которые просто используются для стандартизации ряда данных в районах с нормальным распределением.

Результаты предшествующих работ по засухе в таком регионе на юго-востоке Ирана показали, что применение показателей процента нормальных и арифметических Z-величин неудобен и невыгоден. Благодаря высокой изменчивости количества осадков и существованию нулевых величин в таких регионах эти показатели ведут к неточным результатам, которые не пригодны для пространственных анализов засух и дождей (Raziee et al. 2002).



**Рис. 2.** Гистограмма ряда месячных данных со станции Язд

Как упоминалось ранее, многие исследователи использовали функцию гамма для множества данных по осадкам и указали, что функция гамма подходит больше всего. Мули и Крючер (1968 год), Мули (1973 г.) и Зекаи и Эльджадид (1999 г.) считают функцию гамма-распределения самой подходящей моделью для адаптации ежемесячного количества осадков. Гамма-распределение является одним из самых выгодных непрерывных распределений многих природных явлений, особенно происходящих в засушливых регионах (Zekai and Eljadid, 1999). В данном исследовании различные функции распределения были адаптированы к множеству данных, и результаты показали, что данные по осадкам довольно хорошо следуют функции гамма-распределения. Параметры формы и масштаба определялись с помощью метода максимального сходства. Затем, основываясь на сообщениях Макки и др. (1993, 1995 гг.) данные CDF были подсчитаны и преобразованы в стандартную CDF для того, чтобы рассчитать SPI, используя пакет программного обеспечения Марка Д. Свободы из Национального Центра по смягчению последствий засухи, Линкольн, Небраска. Эта процедура применима для данных всех станций, а значения SPI рассчитывались для временных масштабов на 3, 6, 9, 12 и 24 месяца. Рисунки 3 и 4 показывают два примера рассчитанного временного ряда SPI на период 47 лет (1951-1998 гг.) со станции Язд.

Макки и другие (1993 г.) предлагает классификацию SPI, представленную в табл. 1. Поскольку значения SPI соответствуют типичному нормальному распределению, можно ожидать, что эти значения будут в пределах одного нормального отклонения примерно 68 % времени и в пределах трех нормальных отклонений 99 % времени. Следовательно, согласно данному масштабу экстремальная степень засухи ( $SPI = -2$ ) происходит приблизительно от двух до трех раз в сто лет, приемлемая частота для планирования управления водными ресурсами (Hayes et al. 1999).

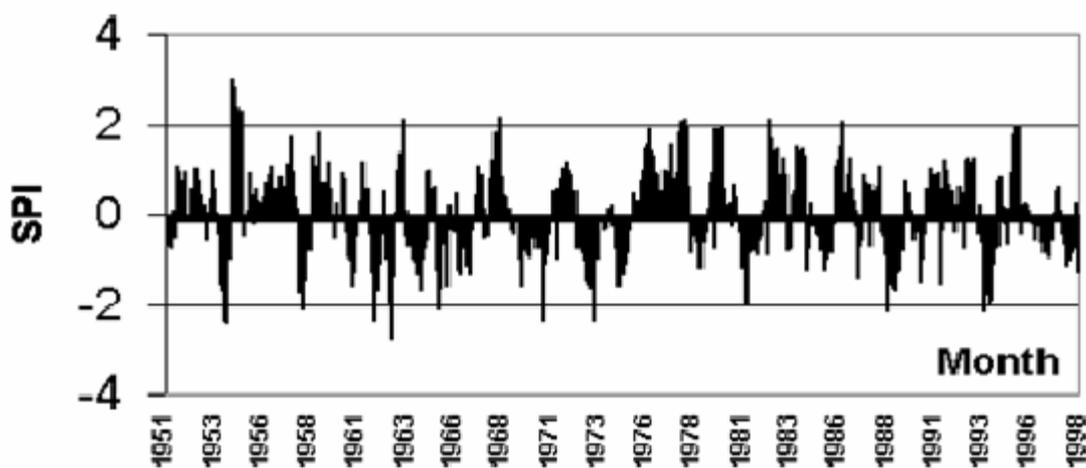


Рис. 3. 6-месячный временной ряд SPI на станции Язд

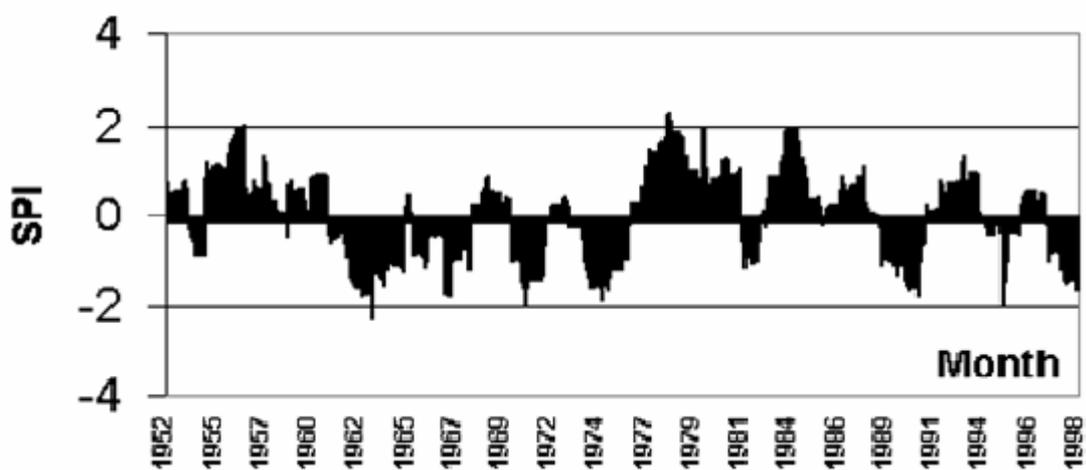


Рис. 4. 24-месячный временной ряд SPI на станции Язд

Таблица (1) Классификация значений SPI

Значения SPI	Категория
2.00 и более	Крайне влажный
1.50-1.99	Очень влажный
1.00-1.49	Умеренно влажный
-.99-.99	Близкий к нормальному
-1.00-(-1.49)	Умеренно сухой
-1.50-(-1.99)	Очень сухой
-2.00 и менее	Крайне сухой

Как показано на рис. 3 и 4, сухие периоды на станции Язд довольно распространены, и за ними неравномерно следуют короткие влажные периоды. Значения SPI на рисунке 4 показывают, что станция Язд зарегистрировала 9 случаев засухи с 1951 по 1998 год. Также ясно, что большей частью они представляли собой сильные и крайне жестокие засухи. Эти цифры также подразумевают, что явление засухи является преобладающей особенностью в подобном регионе, а периоды дождей, разделяющие две следующие друг за другом засухи, типично очень короткие и близки к нормальным. Поэтому, если эти несущественные периоды дождей, которые не влияют положительно на водообеспеченность, не учитывать, то продолжительность периодов засухи возрастает, и потенциал региона в отношении засух тоже увеличится.

Для того чтобы оценить пространственную картину засухи в провинции Язд, мы отразили на карте значения SPI разных временных масштабов для нескольких случаев засухи, используя методы ГИС. Результаты показали, что сплайн-метод, стандартное напряжение при единице массы 2 дали более точные результаты. Рисунки с 5 по 9 иллюстрируют карты SPI для временных масштабов на 3, 6, 9, 12 и 24 месяца во время засухи в декабре 1998 года.

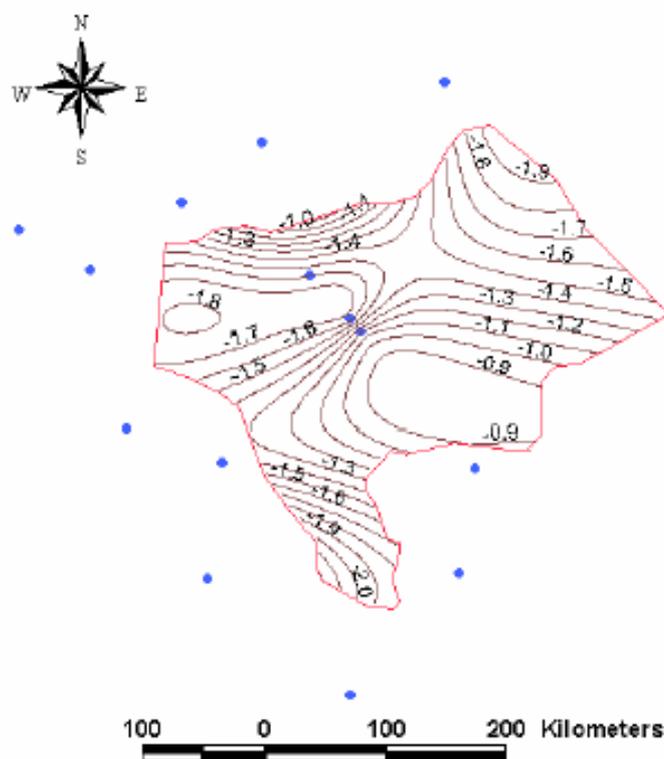


Рис. 5. Декабрь 1998, 3-месячная карта SPI провинции Язд





Рис. 8. Декабрь 1998, 12- месячная карта SPI провинции Язд

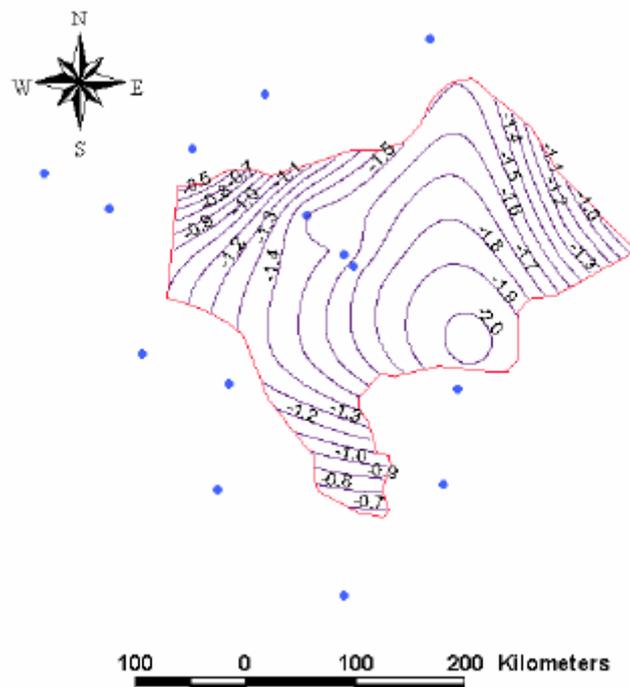


Рис. 9. Декабрь 1998, 24- месячная карта SPI провинции Язд

Карта SPI на три месяца (рис. 5), соответствующая периоду с октября по декабрь 1998 г., показывает, что большая часть провинции испытала засуху от умеренной до сильной. Некоторые области востока и северо-запада региона имели значения SPI равные или больше  $-1$ , что означает, что эти части региона не пострадали от засухи и имели почти нормальный климат. Карта SPI на 6 месяцев (рис.6) по осадкам за период с июля 1998 г. по декабрь 1998 г. почти придержи-

вается структуры карты SPI на три месяца. Степень тяжести засухи снижается от центра провинции к востоку и западу, но возрастает к северу и югу. Карта SPI на 9 месяцев (рис.7) также отражает то, что северо-запад и юго-восток провинции имеют значения SPI больше  $-1$ , что почти нормально согласно классификации SPI. Восточная часть района подверглась засухе от сухой до предельно сухой. В этом временном масштабе центр провинции подобно предыдущим картам также пострадал от сильной до умеренной засух.

Карта SPI на 12 месяцев показывает особенную пространственную картину засухи с ростом степени тяжести к востоку. Максимальная степень тяжести засухи со значением SPI  $-1,6$  обнаружена на восточной границе провинции. Карта SPI на 24 месяца придерживается структуры карты SPI на 12 месяцев с очень сильной засухой на восточной границе провинции, которая постепенно снижается к западу, югу и северу.

### **Заключение**

Как упоминалось ранее, по причине отсутствия данных необходимых для расчета PDSI, применимость этого показателя в Иране ограничена. Более того, PDSI не обеспечивает надежные пространственные результаты в отличие от SPI. С другой стороны, показатели процента от нормального и значений  $Z$  также неудобны и неточны для мониторинга засухи и пространственных анализов в большинстве областей засушливых и полузасушливых регионов Ирана. Результаты современного исследования показали применимость показателя SPI для изучения аномалии выпадения осадков. Благодаря нормализующему процессу в методологии SPI его значения в любой заданной местности могут быть сопоставлены со значениями в других местах, обеспечивая более точный пространственный анализ и сухих, и влажных периодов. Методы, представленные в данном исследовании, можно расширить для мониторинга засух по всей стране. Например, карты засух за декабрь 1998 г. для 5 различных временных масштабов были представлены на рисунках с 5 по 9. Карты с временными масштабами от 3 до 6 месяцев показали, что значения SPI в юго-восточных и западных зонах провинции больше  $-1$ , указывают на нормальное состояние, в то время как остальная часть провинции столкнулась с засухой.

Карта SPI на 9 месяцев за декабрь 1998 г. показала, что в то время как западная часть провинции остается в нормальном состоянии, значения SPI на юго-востоке региона сильно изменяются и отражают засуху от сильной до очень сильной. Карты SPI на 12 и 24 месяца также придерживались той же самой картины с самыми низкими значениями на юго-востоке провинции. Эти карты подразумевают, что юго-восток провинции подвержен гидрологическим засухам, тогда как западная часть провинции сталкивается с метеорологическими и краткосрочными засухами. Следовательно, юго-восточная часть провинции наиболее склонна к засухе и требует управления засухой и должного распределения водных ресурсов.

## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ КАТЕГОРИЯМИ ЗАСУХИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МАРКОВА И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ<sup>9</sup>

А. А. Пауло<sup>10</sup>, К. Коэльо<sup>11</sup>, Л. С. Перейра<sup>2</sup>

### Резюме

В данной статье Стандартизированный индекс осадков (SPI), основанный на данных об осадках за 68 лет, вычислен для нескольких участков региона Алентежу в Северной Португалии, подверженного засухам. Категории засухи устанавливаются при помощи значений SPI. Для однородной и неоднородной формулировки переходов между категориями интенсивности засухи используются цепи Маркова. Моделирование цепи Маркова применяется для того, чтобы определить (а) вероятность различных категорий интенсивности засухи, (б) ожидаемую продолжительность каждой категории интенсивности, (в) продолжительность возвращения к определенной категории засухи и (г) ожидаемую продолжительность изменения SPI при переходе от одной категории к другой. Проверяется схема условного краткосрочного прогнозирования категорий засухи. Для характеристики переходов между категориями интенсивности засухи используются, как модель Маркова, так и логарифмические модели. Несколько логарифмических моделей приспособлены к матрицам перехода между категориями засухи для того, чтобы моделировать вероятности перехода и лучше понять их структуру. Результаты доказывают полезность этих моделей для более подробного описания эволюции процессов засухи и раннего предупреждения засух и их обострения.

### 1. Введение

Засуха является медленным процессом, не имеющим точной даты возникновения и продолжающимся дольше, чем его действительная первопричина, при котором объем продолжительных осадков значительно меньше нормального уровня. Степень интенсивности, продолжительность и распространенность засухи являются основными факторами, объясняющими их существование. Обычно показатели засухи, основанные на одном или более переменных, используются для определения и мониторинга засухи в разных масштабах времени. Индекс степени интенсивности засухи Палмера (Palmer, 1965) является хорошо известным показателем, используемым в основном в США. Широко используется стандартизированный индекс осадков (SPI), несмотря на то, что он был развит недавно (McKee et al., 1993, 1995). Это стандартный индекс, позволяющий сравнить различные участки с различным климатом. Авторегрессион-

<sup>9</sup> 6-я Межрегиональная Конференция по Воде и Окружающей среде «Планирование и управление использованием водных и земельных ресурсов» Альбасете, Испания, 3-5 Сентября 2003 г.

<sup>10</sup> Centro de Estudos de Engenharia Rural, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Tapada da Ajuda, Lisboa, Portugal (apaulo@isa.utl.pt, lspereira@isa.utl.pt)

<sup>11</sup> Unidade ID de Matemática Aplicada, Inst. Sup. de Agronomia, Univ. Técnica de Lisboa (coelho@isa.utl.pt)

ные модели применяются к осадкам и засухам. Подход на основе цепи Маркова, примененный к временным рядам индекса Палмера, доказал себя в качестве полезного инструмента (Lohani and Loganathan, 1997; Lohani et al., 1998).

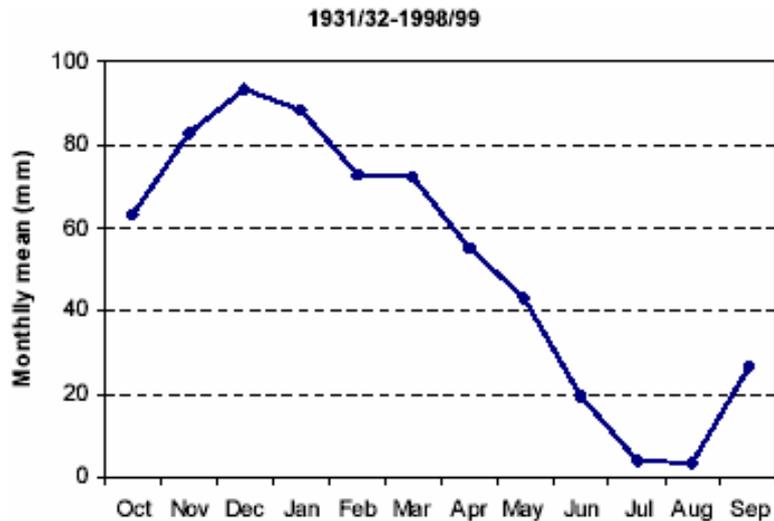
Предметом данной статьи является характер изменения временных рядов SPI по выборочным участкам Алентежо, региона, подверженного засухам (Paulo et al., 2003). Особое внимание уделяется переходам между категориями засухи. Цепи Маркова используются для того, чтобы оценить: (а) вероятность различных категорий интенсивности засухи, (б) ожидаемая продолжительность каждой категории интенсивности, (в) продолжительность возвращения к определенной категории засухи и (г) ожидаемая продолжительность изменения SPI от одной категории к другой. Проверяется схема условного прогнозирования категорий засухи. При неоднородной формулировке цепи Маркова вероятности перехода от одного состояния засухи к другому зависят от рассматриваемого месяца; при однородной формулировке вероятности перехода определяются для всего ряда без распределения по месяцам. Несколько логарифмических моделей приспособлены к матрицам перехода между категориями засухи. Осуществлен выбор модели, которая представляет наилучшую подгонку, и последующую оценку логарифма некоторых неравенств интересов и соответствующих доверительных интервалов.

## 2. Анализ засухи

### 2.1. Данные

Регион Алентежо находится на юге Португалии ( $37^{\circ}20'$  -  $39^{\circ}40'$  северной широты;  $6^{\circ}55'$  -  $8^{\circ}50'$  западной долготы) и имеет площадь в  $27 \times 10^3$  км<sup>2</sup>. Для него характерны экстенсивное земледелие, в основном выращивание зерновых (пшеница), оливковые рощи, виноградники, средиземноморские леса (пробковый дуб), и природные пастбища. Выпадение атмосферных осадков относительно обильное в осенне-зимний период, но очень редкое в летнее время (рис. 1). Летние культуры могут быть выращены, если они орошаются, в то время как производство неорошаемых озимых и весенних культур сильно зависит от количества и характера распределения осадков. Регион часто подвергается засухам.

Табл. 1 представляет географические координаты важных станций, выбранных в зависимости от их местоположения и имеющихся у них данных. Рисунок 2 показывает регион Алентежо и местоположение изучаемых осадкомерных станций. Анализируется ряд локальных индексов SPI (Paulo et al., 2003), вычисляемых по 12 месяцам за период продолжительностью 805 месяцев - с сентября 1932 г. по сентябрь 1999 г.



**Рис. 1. Среднемесячные осадки в регионе Алентежо на основе данных 49 осадкомерных станций**

**Таблица 1. Местоположение выбранных участков**

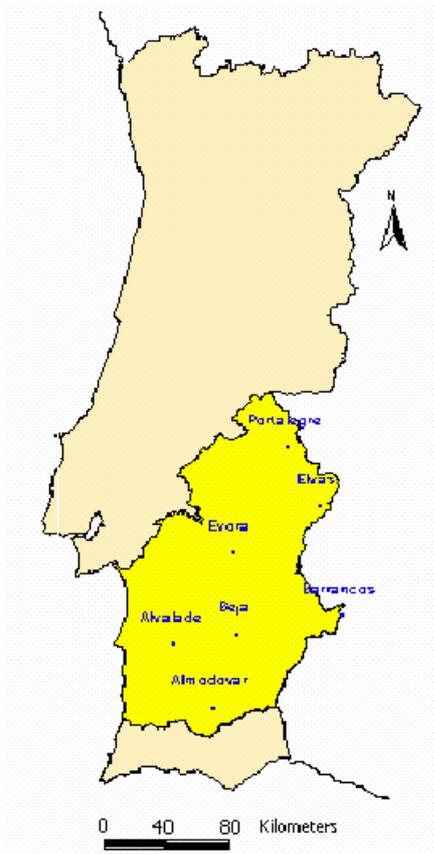
Код станции	Наименование станции	Широта (северн.)	Долгота (западн.)	Высота (м)
18M01	Порталегре	39°17'	7°25'	596
20O01	Элвас	38°53'	7°09'	208
22J01	Эвора	38°34'	7°54'	309
25J02	Вежа	38°01'	7°52'	246
25P01	Барранкос	38°08'	6°58'	380
26G01	Альваладе	37°57'	8°24'	61
28I01	Альмодавар	37°31'	8°04'	270

## 2.2. Стандартизированный индекс осадков (SPI)

Стандартизированный индекс осадков (SPI) является средством, разработанным McKee et al. (1993) в целях определения и мониторинга местных засух. Он предназначен для определения продолжительности и степени интенсивности засух в разных масштабах времени. Большие или меньшие масштабы времени могут отражать запаздывания в ответной реакции различных водных ресурсов на аномалии осадков. McKee et al. (1993) установил критерии «явления засухи» в любом масштабе времени.

Интенсивность засухи определяется произвольно в соответствии со значениями SPI, представленными в табл. 2 (McKee et al., 1993). Ожидаемая продолжительность каждой категории засухи была вычислена на основе анализа, проведенного огромным количеством осадкомерных станций в Колорадо. Процентные соотношения лет, отмеченных как «средне засушливые», «сильно засушливые» и «очень сильно засушливые» соответствует тем значениям, которые ожидают-

ся при нормальном распределении SPI. Рис. 3 показывает динамику SPI на протяжении 12 месяцев года на трех выбранных участках Алентежо.



**Рис. 2. Выбранные участки в Алентежо, где к временным рядам SPI были применены марковский и логарифмический анализы**

**Таблица 2. Распределение значений SPI по категориям и соответствующая продолжительность категорий**

Значения SPI	Категория засухи	Продолжительность каждой категории
от 0. до -0.99	Слабая засуха	24.0%
от -1.00 до -1.49	Средняя засуха	9.2%
от -1.50 до -1.99	Сильная засуха	4.4%
$\leq -2.00$	Очень сильная засуха	2.3%
		40.0%

### 3. Моделирование с использованием цепей Маркова

#### 3.1. Однородная формулировка

Цепь Маркова (Çınlar, 1975) является стохастическим процессом  $X$  в любое время  $t$ , при этом  $X_{t+1}$  условно зависит от  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}$ , при заданном  $X_t$ ; вероятность принятия  $X_{t+1}$  значения  $j$  зависит от прошлого только через его последнее значение  $X_t$ :

$$P\{X_{t+1} = j | X_0, X_1, \dots, X_t\} = P\{X_{t+1} = j | X_t = i\} \quad \forall i, j \in S, t \in \mathbb{N} \quad (1)$$

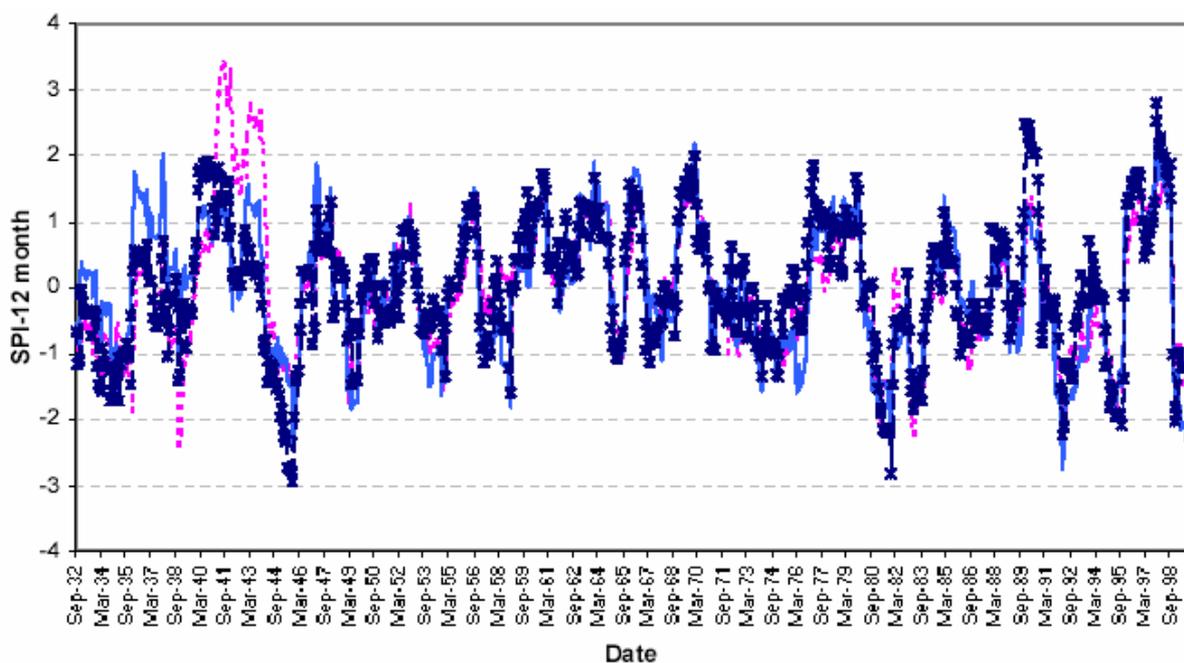


Рис. 3. Изменение SPI в течение 12 месяцев в Элвасе (--- ---),  
Эворе (--- ---) и Бехе (--- ---)

Цепь Маркова характеризуется множеством состояний  $S$  и вероятностью перехода  $p_{ij}$  из одного состояния в другое. Вероятность того, что цепь Маркова в следующий момент времени принимает состояние  $j$  при условии, что в настоящий момент она приняла состояние  $i$ , является вероятностью перехода  $p_{ij}$ .

Порядок получения значений SPI из суммарного количества осадков и распределение их по категориям соответствуют моделированию цепей Маркова.

Матрица вероятностей перехода  $P=[p_{ij}]=P\{X_{t+1}=j|X_t=i\}$  основывается на выборке, определяющей интервал времени, в течение которого SPI переходит из состояния  $i$  в состояние  $j$ , т.е.  $p_{ij}$ :

$$\hat{p}_{ij} = n_{ij} / \sum_j n_{ij} \quad (2)$$

Объем выборки и количество состояний влияют на точность оценок; количество параметров модели зависит от количества состояний. В данном исследовании были рассмотрены временные ряды SPI, размер выборки которых составляет 805, и которые имеют 4 категории засухи, или состояния: нулевая засуха (N), слабая засуха (1), средняя засуха (2) и сильная или очень сильная засуха (3), как представлена в табл. 1. Были оценены следующие пункты: вероятности категорий засухи, также рассматриваемые как установившиеся значения вероятностей, которые представляют вероятности различных категорий засухи; ожидаемая продолжительность каждой категории интенсивности засухи, которая является средней продолжительностью нахождения процесса засухи в определенном состоянии до перехода его в другое; ожидаемая продолжительность первоначального перехода, которая является средним интервалом времени, в течение которого процесс переходит от категории засухи  $i$  к категории засухи  $j$ ; краткосрочное прогнозирование наиболее вероятной категории засухи на ближайшие один, два или более месяцев.

При долгосрочном прогнозировании, вероятности категорий засухи зависят от начального состояния цепи Маркова. Эти вероятности, также рассматриваемые как установившиеся значения вероятностей,  $\pi_j$ , являются единственным решением системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \pi_j = \sum_{k=1}^m \pi_k P_{kj} , j = 1, \dots, m \\ 1 = \sum_{k=1}^m \pi_k \end{cases} \quad (3)$$

Аналитические и эмпирические вероятности категорий засухи представлены в табл. 4; нулевая гипотеза о том, что «эмпирические и аналитические интегральные функции распределения равны», не была опровергнута ни на одном участке, где был использован кви-квадратный критерий адекватности ( $p$ -значение  $> 0.80$ ). Аналитические установившиеся значения вероятностей категории слабой засухи выше, чем те, которые представлены МсКее. Это объяснимо, поскольку классификация слабой засухи по МсКее условно зависит от будущих значений SPI во время установления явления засухи. Вероятности категорий средней и сильной/очень сильной засухи близки значениям, представленным МсКее (1993).

**Таблица 4. Аналитические и эмпирические установившиеся значения вероятностей категорий**

Участки	Аналитические установленные значения вероятностей категорий				Эмпирические установленные значения вероятностей категорий			
	Нулевая	Слабая	Средняя	Сильная/очень сильная	Нулевая	Слабая	Средняя	Сильная/очень сильная
Порталегре	0.4803	0.3623	0.0963	0.0611	0.4820	0.3640	0.0944	0.0596
Элвас	0.4653	0.3774	0.1179	0.0394	0.4671	0.3789	0.1155	0.0385
Эвора	0.4942	0.3155	0.1148	0.0756	0.4981	0.3180	0.1118	0.0721
Беха	0.4824	0.3584	0.0938	0.0654	0.4845	0.3603	0.0919	0.0634
Барранкос	0.4829	0.3404	0.1029	0.0738	0.4857	0.3429	0.1006	0.0708
Альваладе	0.5198	0.2997	0.0981	0.0824	0.5230	0.3019	0.0957	0.0795
Альмодовар	0.4845	0.3668	0.0698	0.0789	0.4857	0.3677	0.0708	0.0759

Вероятность непрерывного пребывания в категории  $i$  в течение  $m$  месяцев вычисляется на основе произведения последовательных переходов между  $X_0$  и  $X_m$  и имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & P(X_1 = i | X_0 = i) P(X_2 = i | X_1 = i) \cdots P(X_{m-2} = i | X_{m-1} = i) P(X_m \neq i | X_{m-1} = i) = \\
 & = P_i^{m-1} (1 - P_i)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

После вычисления вероятности непрерывного пребывания в каждой категории засухи в течение  $m=1,2,\dots,k,\dots$  месяцев, ожидаемая продолжительность непрерывного пребывания в категории  $j$  -  $E(T_j | X_0)$  - определяется следующим образом:

$$E(T_j | X_0) = \sum_k k P(m = k | X_0 = j)
 \tag{5}$$

Ожидаемая продолжительность непрерывного пребывания в каждой категории интенсивности засухи представляет продолжительность пребывания в каждой категории по месяцам (табл. 5). Это средний интервал времени, в течение которого процесс находится в определенной категории засухи до перехода в другую категорию. Средние значения составили 10,1 месяцев по категории «нулевая засуха», 4,5 месяца по «слабой засухе», 2,2 месяца по «средней засухе» и 3,2 месяца по «сильной или очень сильной засухе»; были обнаружены некоторые различия между участками, особенно в категории наиболее сильной засухи, где ожидаемая продолжительность варьировала в пределах от 2,1 (Элвас) до 4,3 (Альмодовар) месяцев. В категории средней засухи ситуация выглядела иначе, при которой ожидаемая продолжительность колебалась в пределах от 2,4 (Элвас) до 1,7 месяца (Альмодовар).

**Таблица 5. Ожидаемая продолжительность пребывания в каждой категории интенсивности (месяцы)**

Участок	Категория интенсивности засухи			
	Нулевая	Слабая	Средняя	Сильная/ очень сильная
Порталегре	9.1	4.4	2.1	2.8
Элвас	11.0	5.1	2.4	2.1
Эвора	11.1	4.3	2.2	2.6
Бежа	9.7	4.7	2.2	4.2
Барранкос	8.7	4.0	2.2	2.6
Альваледо	10.3	4.1	2.3	3.7
Альмодавар	10.9	5.1	1.7	4.3

Средняя продолжительность перехода процесса от одной начальной категории  $i$  к другой  $j$  в первый раз,  $t_{ij}$ , называется ожидаемой продолжительностью перехода. Оно характеризуется как  $t_{ij} = E[\text{количество переходов между состояниями } i \text{ и } j \text{ в первый раз}]$  и является единственным решением системы линейных уравнений

$$t_{ij} = 1 + \sum_{k \neq j} P_{ik} t_{kj}, \forall i, j \quad (6)$$

В табл. 6 представлена ожидаемая продолжительность первоначального перехода к категории нулевой засухи. Очевидно, разница между участками незначительна. Средняя продолжительность возвращения к категории нулевой засухи, связанная с продолжительностью возврата к определенной интенсивности засухи, увеличивается наряду с рассматриваемой степенью интенсивности начальной категории.

**Таблица 6. Ожидаемая продолжительность перехода от любой категории засухи к N (месяцы)**

Участки	Начальная категория засухи		
	Слабая	Средняя	Сильная / очень сильная
Порталегре	9.72	13.63	15.53
Элвас	13.32	17.46	19.25
Эвора	11.91	17.57	19.39
Бежа	10.50	14.94	17.57
Барранкос	9.51	13.79	15.17
Альваладе	9.67	15.55	16.61
Альмодавар	12.10	16.66	19.64

Если  $i=j$ , то  $t_{ii}$  является продолжительностью возвращения к определенной категории засухи  $i$ . Длительность периода возвращения может быть также вычислена с помощью установившегося значения вероятности  $\pi_i$ , т.е.

$$t_{ii} = \frac{1}{\pi_i} \quad (7)$$

Табл. 7 показывает продолжительность возвращения от одной категории к другой на анализируемых участках. Предполагается, что период возвращения к какой-либо категории более длителен для категорий более сильных засух; средние значения по категориям нулевой, слабой, средней и сильной-очень сильной засух составили соответственно 2,1, 2,9, 10,4 и 15,5 месяцев. Исследуемые участки продемонстрировали подобное поведение по всем категориям, кроме категории наиболее сильной засухи; Элвас показал наибольший результат по продолжительности возвращения.

**Таблица 7. Продолжительность повторения категорий засухи (месяцы)**

Участки	Категория засух			
	Нулевая	Слабая	Средняя	Сильная / очень сильная
Порталегре	2.08	2.76	10.38	16.37
Элвас	2.15	2.65	8.48	25.40
Эвора	2.02	3.17	8.71	13.23
Бежа	2.07	2.79	10.66	15.30
Барранкос	2.07	2.94	9.72	13.55
Альваладе	1.92	3.34	10.20	12.14
Альмодовар	2.06	2.73	14.32	12.68
В среднем	2.05	2.91	10.35	15.52
Минимум	1.92	2.65	8.48	12.14
Максимум	2.15	3.34	14.32	25.40

Краткосрочные прогнозы засух по категориям основываются на системе условного прогнозирования. Эта система заключается в вероятностной оценке всех возможных путей от текущего состояния до любого возможного состояния после  $p$  месяцев. Для того, чтобы достичь наиболее возможную категорию через один, два или три месяца, вычисляются следующие вероятности:

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (8-a)$$

$$P(X_{n+2} = j | X_n = i) = \sum_k P(X_{n+2} = j | X_{n+1} = k) \cdot P(X_{n+1} = k | X_n = i) \quad (8-b)$$

$$\begin{aligned}
 &P(X_{n+3} = j | X_n = i) = \\
 &= \sum_l \sum_k P(X_{n+3} = j | X_{n+2} = l) \cdot P(X_{n+2} = l | X_{n+1} = k) \cdot P(X_{n+1} = k | X_n = i)
 \end{aligned}
 \tag{8-в}$$

Прогнозируемая на следующие  $p$ -месяцев категория засухи будет показывать наибольшее значение

$$P(X_{n+p} | X_n = i)
 \tag{9}$$

В табл. 8 представлены категории, наиболее возможные в следующие один, два и три месяца при заданном начальном состоянии.

Поскольку матрицы вероятностей перехода Маркова показывают сильную диагональную тенденцию, эти краткосрочные прогнозы отражают устойчивость последних категорий засухи. Если в настоящий момент интенсивность засухи «нулевая» или «слабая», то в следующие один, два или три месяца она скорее останется такой же; изменения в состоянии непредсказуемы. В случае средней или более сильной засухи интенсивность засухи, в общем, должна уменьшиться в течение ближайших двух или трех месяцев.

### 3.2. Неоднородная формулировка

При неоднородной формулировке рассматриваются матрицы вероятностей перехода в 12 месяцев; вероятность перехода от состояния  $i$  к состоянию  $j$  в момент времени  $n$  зависит от рассматриваемого месяца.

$$P_{ij}^{(n,n+1)} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\}, \quad i = j = \text{“N”}, 1, 2, 3
 \tag{10}$$

**Таблица 8. Наиболее вероятное состояние в следующие один, два и три месяца при заданном начальном состоянии**

Порталегре	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
Начальное состояние						
N	N	0.892	N	0.809	N	0.746
1	1	0.775	1	0.637	1	0.548
2	2	0.520	1	0.396	1	0.429
3	3	0.646	3	0.465	3	0.359
Элвас	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.915	N	0.846	N	0.789
1	1	0.803	1	0.678	1	0.595
2	2	0.587	2	0.423	1	0.462

3	3	0.516	2	0.501	2	0.453
Эвора	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.915	N	0.849	N	0.795
1	1	0.770	1	0.624	1	0.528
2	2	0.544	2	0.387	1	0.366
3	3	0.614	3	0.448	2	0.375
Бежа	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.900	N	0.822	N	0.761
1	1	0.786	1	0.656	1	0.570
2	2	0.534	1	0.419	1	0.445
3	3	0.765	3	0.614	3	0.509
Барранкос	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.888	N	0.805	N	0.742
1	1	0.750	1	0.599	1	0.506
2	2	0.543	2	0.372	1	0.351
3	3	0.607	3	0.431	3	0.337
Альваладе	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.907	N	0.837	N	0.783
1	1	0.757	1	0.605	1	0.506
2	2	0.566	2	0.379	1	0.330
3	3	0.719	3	0.559	3	0.458
Альмодовар	В следующем месяце		В следующие 2 месяца		В следующие 3 месяца	
Начальное состояние	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность	Состояние	Вероятность
N	N	0.913	N	0.843	N	0.787
1	1	0.804	1	0.684	1	0.602
2	2	0.404	1	0.460	1	0.476
3	3	0.767	3	0.626	3	0.527

N-нулевая засуха; 1-слабая засуха; 2-средняя засуха; 3-сильная/очень сильная засуха

Векторы установившихся вероятностей по месяцам  $\pi^{(Month)}$  являются идентичными рядами стохастической матрицы (Isaacson and Madsen, 1976), вычисляемой при помощи последующего произведения матриц вероятностей перехода по месяцам. В октябре-месяце  $\pi^{(Oct)}$  является одним из идентичных рядов стохастической матрицы, полученной путем:

$$\Theta^{(Oct, \infty)} = \left\{ P^{(Oct)} P^{(Nov)} \dots P^{(Aug)} P^{(Sep)} \right\} \cdot \left\{ P^{(Oct)} P^{(Nov)} \dots P^{(Aug)} P^{(Sep)} \right\} \dots \quad (11)$$

Стохастическая матрица в ноябре имеет вид:

$$\Theta^{(Nov, \infty)} = \left\{ P^{(Nov)} \dots P^{(Aug)} P^{(Sep)} P^{(Oct)} \right\} \cdot \left\{ P^{(Nov)} \dots P^{(Aug)} P^{(Sep)} P^{(Oct)} \right\} \dots \quad (12-a)$$

или (Lohani et al, 1998)

$$\Theta^{(Nov, \infty)} = \Theta^{(Oct, \infty)} P^{(Oct)}, \pi^{(Nov)} = \pi^{(Oct)} P^{(Oct)} \quad (12-b)$$

Аналогично этому, ежемесячные вероятности категорий засух за остальные месяцы имеют вид:

$$\pi^{(Dec)} = \pi^{(Nov)} P^{(Nov)}; \pi^{(Jan)} = \pi^{(Dec)} P^{(Dec)}; \dots; \pi^{(Sep)} = \pi^{(Aug)} P^{(Aug)} \quad (13)$$

В табл. 9 представлены вероятности категорий засух, вычисленные на октябрь, январь и апрель.

**Таблица 9. Среднемесячные установившиеся значения вероятностей категорий засух в октябре, январе и апреле**

Участки	Установившиеся значения вероятностей категорий											
	Месяц: октябрь				Месяц: январь				Месяц: апрель			
	N	1	2	3	N	1	2	3	N	1	2	3
Португалегре	0.4803	0.3623	0.0963	0.0611	0.4820	0.3640	0.0944	0.0596	0.4820	0.3640	0.0944	0.0596
Элвас	0.4585	0.3385	0.1379	0.0651	0.5035	0.3296	0.1362	0.0307	0.4454	0.4337	0.0755	0.0453
Эвора	0.5030	0.3219	0.0913	0.0839	0.4878	0.3278	0.0916	0.0928	0.4889	0.3136	0.1367	0.0609
Бежа	0.5031	0.3262	0.0918	0.0790	0.4453	0.3883	0.1359	0.0305	0.4760	0.3736	0.0599	0.0906
Барранкос	0.5328	0.2901	0.1126	0.0645	0.4446	0.3585	0.1513	0.0456	0.4457	0.3436	0.1654	0.0453
Альваладе	0.5318	0.2673	0.1264	0.0746	0.5196	0.2840	0.1055	0.0909	0.5504	0.2839	0.0451	0.1207
Альмодовар	0.4914	0.3196	0.0747	0.1143	0.4745	0.3745	0.1055	0.0455	0.4461	0.3884	0.1202	0.0453

N – нулевая засуха; 1 – слабая засуха; 2 - средняя засуха; 3 – сильная/очень сильная засуха

При неоднородной формулировке вычисление ожидаемой продолжительности по каждой категории интенсивности и ожидаемой продолжительности первоначального перехода, а также краткосрочный прогноз категорий засухи зависят от начального месяца, с которого начинается определение вероятностей перехода из состояния в состояние каждый месяц.

Ожидаемая продолжительность первоначального перехода к состоянию «нулевой засухи» за октябрь, январь и апрель представлены в табл. 10. На всех изучаемых участках период перехода от сильной или очень сильной засухи к нулевой засухе более длителен в январе, за которым следуют апрель и октябрь. Предполагается, что чем выше интенсивность засухи, тем больше времени нужно для возвращения к состоянию нулевой засухи.

Ожидаемая продолжительность непрерывного пребывания в различных состояниях для всего временного ряда SPI представлена на рис. 4. В течение года ожидаемая продолжительность непрерывного пребывания имеет несколько вариаций, что свидетельствует о том, что устойчивость или продолжительность заданного состояния засухи зависит от того, в каком месяце она началась. Существует также некоторая разница между участками.

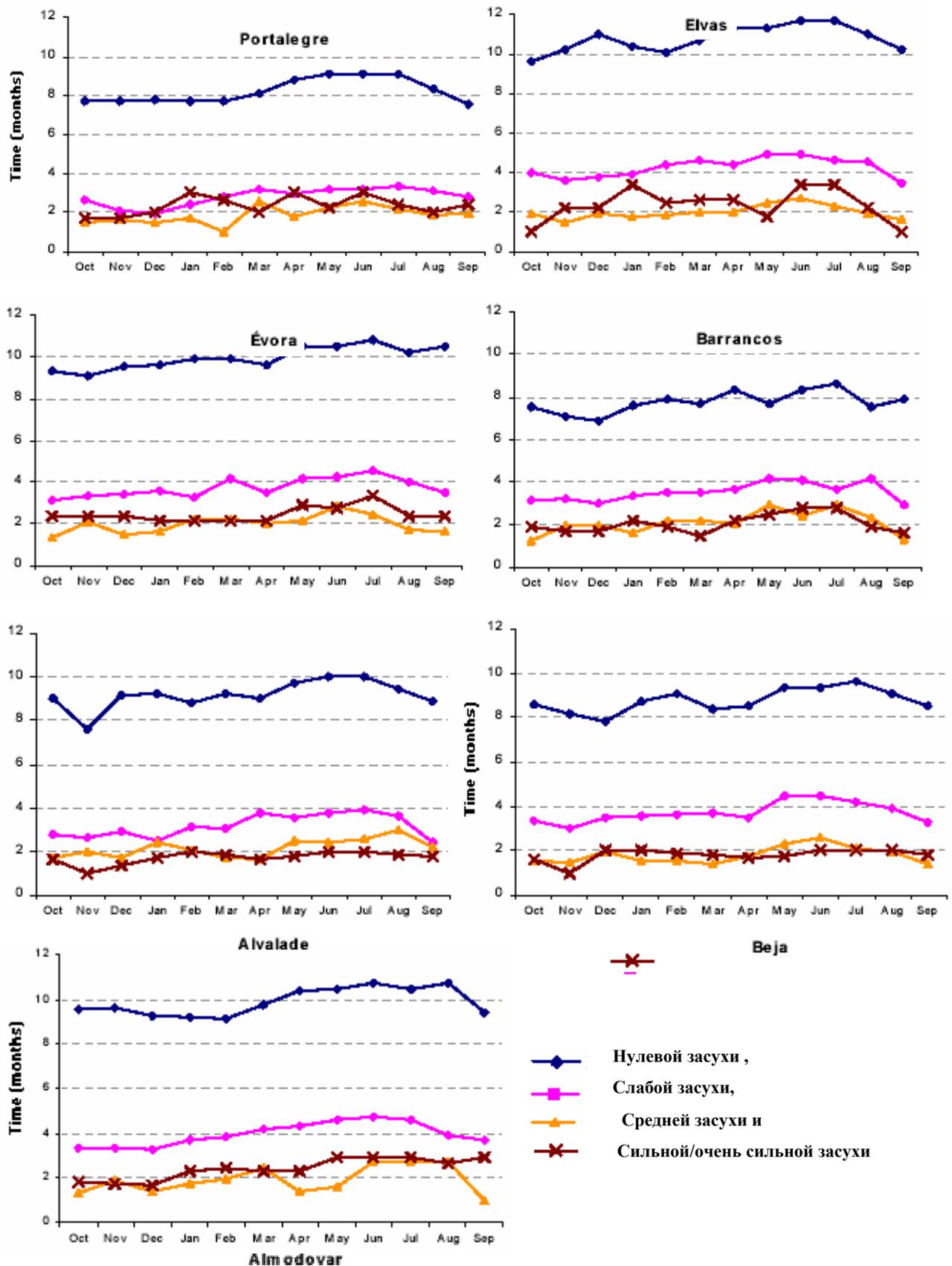


Рис. 4. Продолжительность непрерывного пребывания в состоянии

На участке Барранкос продолжительность отсутствия засухи, очевидно, короче, чем на других участках. Она варьирует в пределах от 6,9 месяцев, если начало приходится на март, до 8,6 месяцев в случае, если период начинается в июле. Элвас, напротив, показывает самую высокую продолжительность отсутствия засухи почти во всех месяцах года, варьирующую от 9,6 месяцев в октябре до 11,7 месяцев в июне. Продолжительность отсутствия засухи имеет максимальное значение, когда время его начала приходится на июль на всех участках, за исключением Альмодовара. Кривые продолжительности средней и сильной/очень сильной засух очень близки.

**Таблица 10. Ожидаемая продолжительность (месяцы) перехода от любой категории засухи к состоянию N с начального месяца**

	Порта- легре	Элвас	Эвора	Бежа	Барран- кос	Альвала- де	Альмодо- вар
Начальная ка- тегория засухи	Начальный месяц: октябрь						
Слабая	7.9	10.5	10.0	9.5	9.4	7.7	10.2
Средняя	10.6	16.9	15.7	13.5	12.8	13.5	16.1
Сильная / очень сильная	11.9	17.7	19.0	14.5	13.3	13.9	16.4
	Начальный месяц: январь						
Слабая	8.6	13.9	11.4	9.8	9.0	8.6	11.6
Средняя	15.0	18.3	17.9	16.5	14.9	15.7	18.4
Сильная / очень сильная	17.9	21.5	20.3	19.9	16.5	19.1	21.6
	Начальный месяц: апрель						
Слабая	11.5	15.2	12.2	11.3	8.7	12.0	12.5
Средняя	14.2	18.5	18.7	14.7	15.6	14.1	19.0
Сильная / очень сильная	16.0	19.8	19.4	18.6	14.8	18.1	21.0

#### 4. Логарифмическое моделирование

Нашей целью является определение с помощью логарифмических моделей (Agresti, 1990) ожидаемой частоты переходов между категориями, которая обозначается как  $E_{ij}$ . Соответствующие наблюдаемые частоты имеют отношение к переходам между категориями засухи на основе индекса SPI, вычисляемого на 12 месяцев. Эти наблюдаемые частоты будут зависимыми переменными реакции для логарифмических моделей. Несколько моделей были приспособлены к переменным реакции. Квази-связанные и квази-симметричные модели оказались наиболее адекватными модельным переходам между категориями засухи. В табл. 11 представлены выбранные модели, соответствующие остаточные отклонения и  $r$ -значения по каждому участку. В Альваладе ни одна из проверенных моделей не подходит данным наблюдений.

Таблица 11. Выбранные логарифмические модели для каждого участка

Участки	Выбранные модели	d.f.	Остаточное отклонение	p-значение
Порталегре	Квази-связанная	4	1.4496	0.8355
Элвас	Квази-симметричная	3	2.8689	0.4123
Эвора	Квази-связанная	4	1.5760	0.8131
Бежа	Квази-симметричная	3	4.2000	0.2407
Барранкос	Квази-связанная	4	3.2840	0.5115
Альваладе	*	*	*	*
Альмодовар	Квази-связанная	4	2.5040	0.6439

\* - нет данных

Квази-связанные модели могут иметь вид:

$$\text{Log } E_{ij} = \lambda + \lambda_i^R + \lambda_j^C + \beta u_i v_j + \delta_i I(i=j) \quad (15)$$

где  $\lambda$  является постоянным условием модели,  $\lambda_i^R$  и  $\lambda_j^C$  представляют параметры  $i$ -ного ряда и  $j$ -ного столбика,  $u_i$  и  $v_j$ , соответственно, являются значениями  $i$ -ной строки и  $j$ -ного столбца при условии, что  $i=1, \dots, 4$  и  $j=1, \dots, 4$ , которые соответственно нумеруют строки и столбцы. В данной модели  $\beta$  является параметром линейной ассоциации, и  $\delta$  является параметром, связанным с  $i$ -ным диагональным элементом, являющимся индикатором функции  $I(i=j)$ , при котором:

$$I(i=j) = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases} \quad (16)$$

В данной модели мы делаем допущение, что  $u_i = i$  и  $v_j = j$ , как это делается наиболее часто. Таким образом,

$$\text{Log } E_{ij} - \text{Log } E_{ik} = \lambda_j^C - \lambda_k^C + \beta u_i (v_j - v_k) + \delta_i I(i=j) - \delta_i I(i=k) \quad (17)$$

( $i=1, \dots, 4$ ;  $j, k \in \{1, 2, 3, 4\}$ , с условием  $j \neq k$ ) является логарифмом неравенств, где через месяц участок будет в категории  $j$  вместо  $k$ , при чем в данный момент мы находимся в категории  $i$ , и

$$\text{Log } E_{ij} - \text{Log } E_{il} = \lambda_j^R - \lambda_l^R + \beta v_j (u_i - u_l) + \delta_j I(i=j) - \delta_j I(i=l) \quad (18)$$

( $j=1, \dots, 4$ ;  $i, l \in \{1, 2, 3, 4\}$ , с условием  $i \neq l$ ) является логарифмом неравенств, где месяц назад участок был в категории  $i$  вместо  $l$ , причем в данный момент участок находится в категории  $j$ .

Таким образом, оценки соответствующих неравенств могут быть получены с помощью возведения в степень результата, найденного путем замены параметров их оценками (полученных путем согласования модели).

Асимптотические доверительные интервалы для этих неравенств, связанные с вероятностью  $1-\alpha$ , могут быть получены путем возведения в степень соответствующих асимптотических доверительных интервалов для логарифмов неравенств,

$$\left[ \overline{\text{Log } O} - z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\overline{\text{Log } O})}, \overline{\text{Log } O} + z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\overline{\text{Log } O})} \right] \quad (19)$$

где  $z_{1-\alpha/2}$  является  $1-\alpha/2$  квантилем нормированной случайной величиной, распределенной по нормальному закону,  $\text{Log } O$  - оценкой логарифма неравенств, которая в соответствии с ситуацией также будет иметь вид:

$$\overline{\text{Log } O} = \overline{\text{Log } E_{ij}} - \overline{\text{Log } E_{ik}} \quad (20)$$

или

$$\overline{\text{Log } O} = \overline{\text{Log } E_{ij}} - \overline{\text{Log } E_{jl}} \quad (21)$$

Согласно квази-симметричной модели:

$$\text{Log } E_{ij} = \lambda + \lambda_i^R + \lambda_j^C + \lambda_{ij}^{RC} I(i < j) + \lambda_{ji}^{RC} I(i > j) \quad (22)$$

где  $\lambda_{ij}^{RC}$  является параметром симметрии. Для данной модели

$$\text{Log } E_{ij} - \text{Log } E_{ik} = \lambda_j^C - \lambda_k^C + \lambda_{ij}^{RC} I(i < j) + \lambda_{ji}^{RC} I(i > j) - \lambda_{ik}^{RC} I(i < k) - \lambda_{ki}^{RC} I(i > k) \quad (23)$$

( $i=1, \dots, 4$ ;  $j, k \in \{1, 2, 3, 4\}$ , с условием  $j \neq k$ ) является логарифмом неравенств, где через месяц участок будет в категории  $j$  вместо  $k$ , при чем в настоящий момент мы он находится в категории  $i$ , и

$$\text{Log } E_{ij} - \text{Log } E_{lj} = \lambda_i^R - \lambda_l^R + \lambda_{ij}^{RC} I(i < j) + \lambda_{ji}^{RC} I(i > j) - \lambda_{lj}^{RC} I(l < j) - \lambda_{jl}^{RC} I(l > j) \quad (24)$$

( $j=1, \dots, 4$ ;  $i, l \in \{1, 2, 3, 4\}$ , с условием  $i \neq l$ ) является логарифмом неравенств, где месяц назад участок был в категории  $i$  вместо  $l$ , при чем в данный момент участок находится в категории  $j$ .

Наблюдаемая и ожидаемая частоты переходов между категориями засухи представлены в табл. 12.

**Таблица 12. Переходы от одной категории засухи к другой в пределах времени  $t$  и  $t+1$ : наблюдаемая и ожидаемая частоты**

	T	Наблюдаемая				Ожидаемая			
		t+1				t+1			
		N	1	2	3	N	1	2	3
Португалегре	N	346	39	3	0	346	39.99	1.92	0.08
	1	41	227	21	4	40.06	227	21.99	3.95
	2	1	22	39	13	1.86	21.17	39	12.97
	3	0	4	13	31	0.08	3.83	13.08	31
Элвас	N	344	31	0	1	344	31.49	0	0.51
	1	32	245	25	3	31.51	245	26.46	2.03
	2	0	27	54	11	0	25.54	54	12.46
	3	0	1	14	16	0.49	1.97	12.54	16
Эвора	N	367	33	1	0	367	33.5	0.49	0.01
	1	34	197	21	4	33.51	197	21.88	3.61
	2	0	22	49	19	0.48	21.15	49	19.38
	3	0	3	19	35	0.01	3.36	18.63	35
Бежа	N	351	37	2	0	351	37.47	1.02	0.51
	1	38	228	23	1	37.53	228	23.46	1.02
	2	0	23	39	11	0.98	22.54	39	10.47
	3	1	1	10	39	0.49	0.98	10.53	39
Барранкос	N	347	44	0	0	347	43	0.94	0.06
	1	42	207	21	6	43.03	207	19.84	6.12
	2	2	18	44	17	0.91	19.27	44	16.82
	3	0	6	16	34	0.05	5.73	16.22	34
Альмодовар	N	357	33	1	0	357	33.51	0.48	0.01
	1	34	238	22	2	33.5	238	21.42	3.08
	2	0	21	23	13	0.49	21.6	23	11.91
	3	0	4	10	46	0.01	2.89	11.1	46

N-нулевая засуха; 1-слабая засуха; 2-средняя засуха; 3-сильная/очень сильная засуха

В табл. 13 приведены некоторые результаты относительно неравенств, что через месяц участок будет находиться в категории «нулевой засухи» (N) вместо любой другой категории при условии, что в данный момент мы будем находиться в категории  $i$  ( $i=1,2,3,4$  соответственно для категории «нулевой засухи» N, и остальных категорий 1, 2 и 3). Например, оценка по неравенствам  $E_{21}/E_{23}$  составляет 1,8185, т.е. более 1,8185 раза вероятно, что в момент времени  $t+1$  участок будет в категории «нулевой засухи» ( $j=1$ ), а не средней ( $k=3$ ), при том, что в момент  $t$  участок находится в категории сильной засухи ( $i=2$ ). Если 1-ое состояние будет включено в доверительный интервал для заданных неравенств, то соответствующие ожидаемые частоты перехода не будут сильно различаться.

## 5. Заключение

Моделирование цепей Маркова, применяемых здесь к временным рядам индекса SPI, служит определению вероятностей категорий засухи на долгосрочную перспективу, очень похожих тем, которые определяются Макки. Ожидаемая продолжительность непрерывного пребывания в заданной категории интенсивности засухи является хорошим показателем устойчивости определенной категории засухи. Анализируемые участки показывают, что продолжительность

категории сильной/очень сильной засухи выше, чем продолжительность средней засухи. Как и предполагалось, категория «нулевой засухи» оказалась самой продолжительной.

При рассмотрении неоднородной формулировки, были наблюдаены некоторые изменения в продолжительности в течение года с увеличением значений с середины весны до августа, что говорит о том, что в случае наступления засухи какой-либо категории в данный период можно предположить, что она будет длиться дольше, чем если бы она произошла в другое время года. Ожидаемая продолжительность перехода к категории «нулевой засухи» от любой другой может приблизиться к ожидаемой продолжительности возвращения от заданной категории засухи.

**Таблица 13. Оценки и доверительные интервалы для неравенств  $E_{i1}/E_{ik}$**

		Категория засухи в момент времени t+1		
		1 (k=2)	2 (k=3)	3 (k=4)
<b>Порталегре</b>				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	8.6452 [6.2591, 11.9408]	179.6481 [64.0170, 504.1388]	4138.1330 [806.8272, 21224.0561]
	1 (i=2)	0.1762 [0.1264, 0.2457]	1.8185 [1.1072, 2.9867]	10.1148 [4.3466, 23.5380]
	2 (i=3)	0.0875 [0.0311, 0.2464]	0.0475 [0.0162, 0.1392]	0.1424 [0.0454, 0.4470]
	3 (i=4)	0.0211 [0.0054, 0.0821]	0.0062 [0.0011, 0.0334]	0.0026 [0.0005, 0.0141]
<b>Эвора</b>				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	10.9572 [7.6914, 15.6089]	740.2589 [102.4944, 5346.4700]	32532.67 [1961.061, 539694.667]
	1 (i=2)	0.1702 [0.1187, 0.2440]	1.5250 [0.8983, 2.5890]	9.2813 [3.8495, 22.3775]
	2 (i=3)	0.0226 [0.0031, 0.1641]	0.0097 [0.0013, 0.0724]	0.0246 [0.0033, 0.1868]
	3 (i=4)	0.0031 [0.0002, 0.0436]	0.0006 [0.00003, 0.0097]	0.0003 [0.00002, 0.0052]
<b>Барранкос</b>				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	8.0687 [5.8831, 11.0665]	369.8139 [90.7005, 1507.8458]	6075.381 [810.4757, 45541.4717]
	1 (i=2)	0.2080 [0.1503, 0.2879]	2.1728 [1.3040, 3.6203]	7.0569 [3.4079, 14.6131]
	2 (i=3)	0.0474 [0.0116, 0.1940]	0.0208 [0.0049, 0.0881]	0.0545 [0.0128, 0.2328]
	3 (i=4)	0.0094 [0.0015, 0.0600]	0.0033 [0.0004, 0.0256]	0.0016 [0.0002, 0.0120]

		Категория засухи в момент времени t+1		
		1 (k=2)	2 (k=3)	3 (k=4)
Альмодовар				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	10.6547 [7.4749, 15.1871]	737.3038 [101.0336, 5380.5566]	32925.41 [1916.283, 565721.727]
	1 (i=2)	0.1407 [0.0980, 0.2021]	1.5621 [0.9243, 2.6399]	10.8482 [4.1621, 28.2747]
	2 (i=3)	0.0226 [0.0031, 0.1640]	0.0212 [0.0028, 0.1594]	0.0408 [0.0052, 0.3186]
	3 (i=4)	0.0035 [0.0003, 0.0491]	0.0009 [0.00005, 0.01625]	0.0002 [0.00001, 0.00392]
Элвас				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	10.9244 [7.5903, 15.7231]	∞	677.9001 [89.7315, 5121.3967]
	1 (i=2)	0.1286 [0.0888, 0.1863]	1.1901 [0.7148, 1.9813]	15.5180 [5.0843, 47.3630]
	2 (i=3)	0	0	0
	3 (i=4)	0.2501 [0.0275, 2.2756]	0.0393 [0.0051, 0.3005]	0.0308 [0.0038, 0.2468]
Бежа				
Категория засухи в момент времени t	N (i=1)	9.3652 [6.7065, 13.0778]	344.4676 [82.3817, 1440.3436]	693.6725 [92.1356, 5222.5383]
	1 (i=2)	0.1645 [0.1168, 0.2316]	1.6000 [0.9687, 2.6427]	36.8922 [8.3123, 163.7382]
	2 (i=3)	0.0435 [0.0104, 0.1824]	0.0252 [0.0058, 0.1088]	0.0937 [0.0201, 0.4362]
	3 (i=4)	0.4981 [0.0450, 5.5181]	0.0465 [0.0061, 0.3542]	0.0126 [0.0016, 0.0970]

N-нулевая засуха; 1-слабая засуха; 2-средняя засуха; 3-сильная/очень сильная засуха

При неоднородной формулировке была установлена некоторая разница между месяцами.

Продолжительность повторения категорий засухи может показать период временного ряда. Продолжительность возвращения увеличивается вместе с категориями засухи. Прогнозирующая возможность марковского однородного и неоднородного моделирования в отношении краткосрочных прогнозов не очень эффективна. Поскольку матрицы вероятностей перехода показывают сильную диагональную тенденцию, последние состояния засух имеют тенденцию к воспроизведению в краткосрочных прогнозах. Результаты логарифмического моделирования сходятся с результатами моделей Маркова.

Анализ показывает, что регион Алентехо является относительно однородным в отношении засух. В дальнейшем необходимо провести исследования, которые позволили выявить методы более точного прогнозирования.

## 6. Признательность

Данные, использованные в этом исследовании, были предоставлены Институтом воды (INAG), Португалия. Данное исследование было финансировано через национальный проект PEDIZA 1999.64.006326.1 и в настоящее время является частью исследовательского контракта INTERREG III B MEDOC 2002-02-4.4-1-084.

## 7. Литература

- Agresti, A. (1990). *Categorical Data Analysis*. J. Wiley&Sons, New York.
- Çınlar, E. (1975). *Introduction to stochastic processes*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Isaacson, D.L. and Madsen, R. (1976). *Markov Chains: Theory and Applications*, John Wiley, New York.
- Lohani, V.K. and Loganathan, G.V. (1997). An Early Warning System for Drought Management Using the Palmer Drought Index, *Journal of American Water Resources Association*, vol. 33, No. 6, pp. 1375-1386.
- Lohani, V.K., Loganathan, G.V. and Mostaghimi, S. (1998). Long-Term Analysis and Short-Term Forecasting of Dry Spells by the Palmer Drought Severity Index, *Nordic Hydrology*, 29(1), pp. 21-40.
- McKee, T. B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conference on Applied Climatology. Am. Meteor. Soc., Boston, pp. 179-184.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. In: 9th Conference on Applied Climatology, Am. Meteor. Soc., Boston, pp. 233-236.
- Palmer, W. (1965). *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau, Res. Paper No 45, Washington
- Paulo, A. A., Pereira, L. S. and Matias, P. G. (2003). Analysis of local and regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the Standardized Precipitation Index. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*, Kluwer, Dordrecht, pp. 55-78.

## АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ<sup>12</sup>

**В. П. Мелешко, В. М. Катцов, В. А. Говоркова, С. П. Малевский-Малевич, Е. Д. Надежина, П. В. Спорышев**

Оцениваются изменения климата на территории Северной Евразии в XXI веке, обусловленные ростом парниковых газов по сценариям МГЭИК А2 и В2, на основании расчетов с помощью ансамбля совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Расчеты выполнены для крупнейших водосборов России и сопредельных регионов. Приводятся оценки изменения термического режима и ряда гидрологических характеристик в разные сезоны для середины и конца XXI века. Анализируются также изменения распространения вечной мерзлоты и ледового покрова в Северном Ледовитом океане.

### Введение

В последнее время климат России как часть глобальной климатической системы все чаще исследуется в рамках крупных международных программ, так или иначе связанных с оценкой возможных в будущем его изменений. Различные регионы России стали предметом внимания со стороны программы GEWEX [[www.gewex.org](http://www.gewex.org)], а также программы ACSYS, на смену которой пришла программа СНС [<http://acsys.npolar.no>]. Одной из новых международных инициатив, в сферу интересов которой, наряду с другими арктическими регионами, попадает российская Арктика, является «Оценка климатических воздействий в Арктике» (ACIA [2, 11]). Наконец, нельзя не упомянуть еще один крупный исследовательский проект, недавно инициированный Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) США, совместно с Российской академией наук, - так называемую «Инициативу партнерства в области наук о Земле в Северной Евразии» (NEESPI [<http://neespi.gsfc.nasa.gov>]).

Интерес, который вызывает территория России в контексте климатических исследований, объясняется не только ее размерами. Большая часть этой территории находится в высоких широтах Северного полушария, где, согласно данным наблюдений, в настоящее время происходят значительные изменения климата (см., например, [12, 18]). Согласно [1], потепление климата на территории России за прошлое столетие составило 0,9°C при глобальном среднегодовом потеплении 0,6°C [25]. Оно заметно усилилось во второй половине XX столетия. Так, наибольший среднегодовой тренд за этот период наблюдался в Средней и Восточной Сибири и составил 3,5°C/100 лет, а зимой 4,7°C/100 лет.

Более того, именно в указанных широтах все известные климатические модели прогнозируют усиление глобального потепления, вызванного антропогенным ростом содержания парниковых газов в атмосфере [15]. Однако интерес к климату России не исчерпывается высокими широтами. Есть основания считать, что вызванные глобальным потеплением изменения снежно-ледяного покрова, растительности, землепользования и т. п. на территории России могут оказать кли-

<sup>12</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

матически значимыми далеко за ее пределами. Изменения гидрологического цикла на водосборах северных рек (прежде всего сибирских) могут повлиять на пресноводный бюджет Северного Ледовитого океана и далее на формирование глубинных вод в субарктических морях Северной Атлантики [10, 34]. Изменения биосферы на территории России, в частности биомассы леса (например, в результате смещения климатических зон, изменения повторяемости и пространственных масштабов лесных пожаров и т. п.), могут оказать влияние на глобальный биогеохимический и энергетический циклы. Не исключено значительное влияние таяния вечной мерзлоты, сопровождающегося выделением метана и углекислого газа, на глобальный углеродный бюджет.

Таким образом, возможные в будущем изменения глобального климата могут иметь важные (в том числе негативные) экологические и социально-экономические последствия для России, а климатические изменения на территории России в свою очередь могут оказывать обратное воздействие на глобальный климат. Между тем официального национального документа, обобщающего исследования возможных изменений климата и их последствий для России в XXI столетии - по аналогии с документами такого рода, опубликованными в ряде стран (см., например, [36]), - не существует.

Основной целью настоящей статьи является попытка оценить возможные изменения климата России и сопредельных стран в XXI веке в случае реализации сценариев антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему, разработанных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [35]. Разумеется, в рамках одной, даже большой, статьи невозможно представить полную картину будущих изменений климата на столь обширной территории. Поэтому мы ограничились рассмотрением лишь нескольких климатических характеристик, которые представляются нам наиболее важными<sup>13</sup>.

Обсуждению предсказуемости климата посвящен следующий раздел этой статьи. В третьем разделе рассматриваются сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозолей в XXI веке. В качестве инструмента оценки изменений климата в XXI веке мы используем наиболее известные глобальные объединенные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), которые обсуждаются в четвертом разделе. В пятом разделе анализируется качество воспроизведения современного климата с помощью ансамбля МОЦАО. Шестой раздел посвящен центральному вопросу нашей статьи - как может измениться климат России и сопредельных стран в течение XXI века под воздействием антропогенных изменений содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере. В заключении приводятся основные выводы, сделанные на основе проведенного анализа.

## **Предсказуемость климата**

При расчете будущих изменений климата, вызванных ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, возникает вопрос, предсказуем ли климат на сроки от нескольких десятилетий до столетия и если да, то на каких физических принципах эта предсказуемость основывается. Ответ на этот вопрос представляется чрезвычайно важным, если принять во внимание ограниченную успешность прогнозов погоды на сроки несколько месяцев во многих регионах земного шара [22, 37], а также неопределенности будущих эмиссий парниковых газов и аэ-

<sup>13</sup> Часть результатов, обсуждаемых в настоящей статье, была представлена в докладе на Всемирной конференции по изменению климата (Москва, 2003 г.). Расширенные тезисы этого доклада опубликованы в [4].

розолей, несовершенство современных моделей климата и неточное знание начального состояния климатической системы [25, 42]. С точки зрения предсказуемости климата существуют различия между его изменениями, связанными с естественными взаимодействиями в системе океан - атмосфера - криосфера - биосфера, и изменениями, обусловленными радиационным воздействием парниковых газов в атмосфере.

При расчетах изменений климата на несколько десятков лет важную роль играет начальное состояние океана, которое определяется неточно, а также начальная концентрация парниковых газов и ее изменения. Как отмечается в [43], вследствие непрерывного накопления парниковых газов в атмосфере климатическая система находится в неравновесном состоянии, и океан как очень инерционная среда медленно, с запаздыванием в несколько десятков лет реагирует на изменения радиационных потоков на верхней границе атмосферы. Это означает, что современные антропогенные изменения климата являются результатом аккумулярованного (за прошлые десятилетия) радиационного воздействия на систему атмосфера - поверхность Земли, что способствует повышению предсказуемости климатической системы в целом. Принимая во внимание большое время существования многих парниковых газов в атмосфере, можно с уверенностью считать, что их концентрации в атмосфере в течение нескольких десятилетий будут определяться современным уровнем их поступления в атмосферу. Хотя влияние начального состояния океана и его изменчивости на предсказуемость недостаточно изучено, по-видимому, можно принять, что это влияние может распространяться не более чем на полстолетия. За пределами этого временного масштаба изменения климата будут преимущественно определяться интенсивностью аккумулярованного воздействия парниковых газов, а не начальным состоянием климатической системы.

### **Сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозолей МГЭИК**

МГЭИК разработала долгосрочные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI веке, которые опубликованы в Специальном докладе о сценариях выбросов (СДСВ) [41]. Сценарии СДСВ основаны на широком перечне демографических, экономических и технологических факторов, определяющих эмиссии. Общее число сценариев - 40, и все они объединены в четыре основные сюжетные группы. Эволюция концентраций различных парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) в атмосфере в течение XXI века определялась с помощью современных фотохимических и карбонатных моделей [25].

К настоящему времени с большинством МОЦАО были проведены расчеты эволюции климата в XXI столетии с использованием двух сценариев СДСВ: А2 и В2.

По сценарию А2 развитие мира будет проходить на основе сохранения местной самобытности и опоры на собственные природные ресурсы при постоянном росте общей численности населения в мире. Экономическое развитие будет иметь региональную направленность, а экономический рост в расчете на душу населения и технологические изменения будут более фрагментарными и медленными по сравнению с другими основными сюжетными группами. В результате такого развития ожидается значительный рост концентрации основных парниковых газов в атмосфере. В соответствии со сценарием А2, концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере достигнет удвоения к 2055 г. по сравнению с доиндустриальным периодом (т. е. с периодом до 1850 г.). В 2100 г. концентрация основных парниковых газов в

атмосфере увеличится по сравнению с принятым за базовый 1990 г.:  $\text{CO}_2$  в 2,42,  $\text{CH}_4$  в 2,19 и  $\text{N}_2\text{O}$  в 1,45 раза.

По сценарию В2 мировое развитие будет сосредоточено на решении локальных проблем экономической, социальной и экологической устойчивости с постоянно увеличивающимся населением Земли при темпах ниже, чем в сценарии А2. Хотя данный сценарий ориентирован на охрану окружающей среды и решение социальных проблем, главное внимание в нем уделяется вопросам регионального развития. Этот сценарий очень близок к современному уровню развития, и прогностический рост эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу примерно соответствует его росту за последние 10 лет [25]. По сценарию В2 концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере достигнет удвоения по сравнению с доиндустриальным периодом к 2080 г. В 2100 г. концентрация основных парниковых газов увеличится по сравнению с базовым 1990 г.:  $\text{CO}_2$  в 1,76 раза,  $\text{CH}_4$  в 1,75 раза и  $\text{N}_2\text{O}$  в 1,18 раза.

Сценарии А2 и В2 можно рассматривать как промежуточные в группе сценариев СДСВ. До середины XXI столетия различия между ними невелики, во всяком случае в средних глобальных оценках изменения климата (например, см. рис. 9.14 в [15]), а к концу столетия ожидаются значительные различия между ними с более сильным потеплением при сценарии А2.

## Модели МГЭИК

Выбор МОЦАО для оценки будущих изменений климата является непростой задачей, учитывая все возрастающее количество моделей этого класса. (В настоящее время в мире существует более двух десятков МОЦАО, качество которых варьирует в довольно широких пределах.) Анализ качества современных МОЦАО показал, что ни одна из них не может быть признана удовлетворяющей современным требованиям с точки зрения точности воспроизведения современного климата, поэтому для оценок возможных в будущем изменений климата следует использовать ансамбль из нескольких моделей [32] (подробнее об ансамблях см. в следующем разделе). Критериями отбора МОЦАО [26, 40] являются: время создания используемой версии модели; разрешение; качество расчетов современного климата и его эволюции в прошлом, а также доступность результатов расчета возможных в будущем состояний климатической системы. Более того, выбранные модели относятся к классу МГЭИК, результаты которых широко использовались при подготовке третьего отчета МГЭИК. С учетом перечисленных критериев в настоящем исследовании использованы результаты расчетов по семи МОЦАО, названия и основные характеристики которых приводятся в табл. 1. Результаты расчета неравновесной реакции климата на изменения газового состава атмосферы с помощью этих моделей на протяжении ряда лет содержатся в архиве МГЭИК, который постоянно пополняется новыми данными и общедоступен через интернет [[www.dkrz.de/ipcc/ddc/html/dkrzmain.html](http://www.dkrz.de/ipcc/ddc/html/dkrzmain.html)]. В дальнейшем для краткости мы будем называть их моделями МГЭИК или просто моделями. Все эти модели широко известны, хорошо документированы<sup>14</sup> и участвуют в крупнейших международных проектах сравнения (таких, как АМIP [19] и СМIP [33]). В табл. 1 горизонтальное разрешение атмосферного и океанского компонентов МОЦАО характеризуется шагом сетки в градусах широты (долготы) или (в атмосфере) в виде спектрального усечения с приблизительным переводом в размер

<sup>14</sup> То есть опубликованы подробные описания этих моделей, а также результаты их валидации и различных исследований с их использованием.

шага сетки. Вертикальное разрешение (L) суть число уровней по вертикали. Обозначения, принятые для деятельного слоя суши: В - однослойная гидрологическая схема с фиксированной влагоемкостью почвы («bucket»); ВВ - модифицированная схема «В» с изменяющейся регионально влагоемкостью почвы и (или) поверхностным сопротивлением; М - многослойная схема расчета температуры почвы; С - сложная схема поверхности суши, обычно включающая несколько слоев для расчета температуры и влажности почвы, а также учет растительности в явном виде; F - учет процессов замерзания почвы; R - перенос локального стока в океан (поверхность суши разделена на водосборы рек). Обозначения, принятые для морского льда: Т - термодинамическая модель; F - упрощенная динамика льда в виде «свободного дрейфа»; R - включение реологии морского льда. Обозначения, принятые для описания процедуры коррекция потоков: Н - поток тепла; W - поток влаги; М - поток импульса (звездочка означает использование только среднегодовых значений корректирующих членов; прочерк - отсутствие коррекции потоков).

К сожалению, далеко не все интересующие нас климатические характеристики были доступны из архива МГЭИК. Кроме того, некоторые характеристики имелись в расчетах лишь с несколькими моделями или только для одного сценария выбросов. Поэтому в анализе тех или иных характеристик мы использовали данные разного числа моделей, которое в дальнейшем оговаривается при обсуждении результатов.

Еще одним существенным ограничением в проведенном анализе было то, что в нашем распоряжении имелись лишь среднемесячные поля, в то время как данные более высокого временного разрешения были недоступны. Это не позволило получить оценки будущих изменений экстремальных режимов для рассматриваемой территории.

### **Расчеты современного климата России с помощью моделей МГЭИК**

Недавно оценки возможных изменений гидрологического режима на отдельных водосборах России в XXI столетии были выполнены в [7] путем анализа расчетов по двум физически полным МОЦАО и одной упрощенной модели. На фоне значительной межгодовой и многолетней вариаций отмечается общее увеличение осадков и стока в рассматриваемых бассейнах, а также рост их изменчивости в XXI столетии. Важно отметить, что выполненные ранее расчеты изменений климата с помощью отдельных моделей для территории России существенно зависят от их систематических ошибок и в особенности от чувствительности модели к антропогенному воздействию.

В настоящее время в оперативной практике динамических прогнозов погоды и исследованиях климата стали широко применяться ансамблевые расчеты по одной или нескольким моделям и методы их статистической интерпретации [25, 29]. Формирование климатического ансамбля при помощи одной модели, но с разными начальными условиями, позволяет получить среднее изменение климата, в котором вклад модельной климатической изменчивости может быть заметно уменьшен с ростом числа членов ансамбля. При этом можно получить и более правильную оценку внутренней климатической изменчивости, которая будет различна для отдельных членов ансамбля.

Расчеты современного климата с помощью ансамбля глобальных моделей атмосферы и МОЦАО, участвующих в международных программах сравнений AMIP и

CMIP, показали, что средние по ансамблю характеристики климата лучше согласуются с наблюдениями, нежели рассчитанные с помощью отдельных моделей [8]. Преимущества мультимодельных оценок будущих изменений климата обсуждаются в докладе МГЭИК [25]. При одном и том же сценарии изменений концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере изменения климата, рассчитанные с помощью разных моделей, различаются между собой из-за различий в модельных описаниях физических процессов. В результате в моделях формируются разные по величине и даже знаку обратные связи, которые определяют реакцию модельной климатической системы на внешние воздействия. При условии, что погрешности моделей, связанные с описанием обратных связей, являются случайными, оценка изменения климата, полученная с помощью мультимодельной реализации, по-видимому, будет тем достовернее, чем больше членов содержится в ансамбле. Важным условием достоверности оценок будущих изменений климата является способность моделей воспроизводить основные характеристики современного климата [13]. На рис. 1 представлены осредненные за год среднеквадратические ошибки для распределений температуры воздуха у поверхности земли и осадков в Северном полушарии, рассчитанных с помощью каждой из семи МОЦАО МГЭИК в отдельности и по всему ансамблю. Расчеты относятся к периоду 1981-2000 гг., который мы используем в качестве базового климатического периода для всех обсуждаемых в следующем разделе оценок будущих изменений климата. Среднеквадратические ошибки отдельных моделей нормированы на ошибки «средней по ансамблю» модели и ранжированы в порядке возрастания. При вычислении ошибок использованы климатические данные о температуре воздуха [30] и осадках GPCP [24]. На рисунке видно, что ошибки, полученные по ансамблю моделей, получились меньше ошибок любой из рассматриваемых моделей.

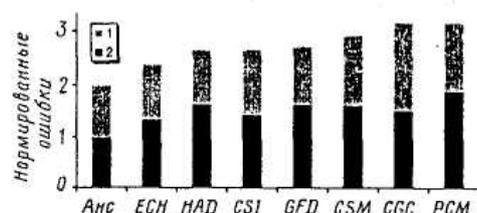


Рис. 1. Осредненные за год среднеквадратические ошибки для распределений температуры воздуха у поверхности земли (1) и осадков (2) в Северном полушарии, рассчитанных с помощью каждой МОЦАО и по ансамблю (Анс).

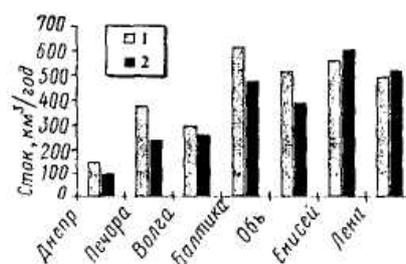


Рис. 2. Средний за год водный баланс (сток) на отдельных водосборах, рассчитанный по ансамблю из пяти моделей (1) и полученный по данным наблюдений (2) [5, 23].

Для анализа климата и его изменений удобно использовать водосборы крупных рек, поскольку, во-первых, они характеризуются наименьшим пространственным масштабом, для которого достоверность расчетов с помощью МОЦАО признается удовлетворительной [32]; во-вторых, в отсутствие надежных данных об испарении, наблюдения за речным стоком, отличающиеся сравнительно высокой точностью, позволяют получить интегральные среднегодовые оценки разности осадков и испарения для водосбора в целом, весьма важные для верификации МОЦАО.

Качество расчетов составляющих теплового и водного балансов на водосборах крупных рек с помощью современных климатических моделей анализировалось в ряде работ [3, 8, 9, 28, 45, 46]. В частности, сравнительный анализ моделей, участвовавших в программе АМIP, показал, что имеется большое число моделей, которые демонстрируют высокое качество расчета сезонного хода радиационных, термических и влажностных характеристик климата на крупных водосборах. При этом подавляющее большинство характеристик климата, полученных по ансамблю моделей, лучше согласуется с данными наблюдений, чем соответствующие характеристики отдельных моделей, даже высокого качества. Нами был проведен сравнительный анализ некоторых наиболее важных характеристик климата, рассчитанных по ансамблю моделей МГЭИК и полученных по данным наблюдений для водосборов отдельных крупных рек или групп рек на территории России и сопредельных с ней регионов. Для анализа были выбраны следующие водосборы: Балтийский, включающий все реки Скандинавии, прибалтийских стран и северо-запада России, впадающие в Балтийское море; группа северных рек европейской части России, впадающих в Северный Ледовитый океан (Печора, Северная Двина, Мезень и др.); группа южных рек, впадающих в Черное и Азовское моря (Днепр, Днестр, Дон, Кубань); а также Волга и Урал; Обь; Енисей; Лена. В дальнейшем при упоминании водосборов их названия будут отождествляться с названием первой из упомянутых рек. Средний за год водный баланс отдельных водосборов, определяющий сток с водосборов, рассчитанный по ансамблю из семи моделей и полученный из наблюдений, представлен на рис. 2. Как видно, для большинства водосборов средние по ансамблю оценки среднего за год стока находятся в удовлетворительном согласии с данными наблюдений.

Из-за ограниченного объема статьи мы не имеем возможности показать результаты расчетов других характеристик современного климата на водосборах.

## **Оценки изменений климата России и сопредельных стран в XXI веке**

Для оценки будущих изменений климата России и сопредельных стран мы выбрали сценарий эмиссий В2 в качестве основного, поскольку именно для этого сценария располагали наибольшим объемом модельных данных. Различия между сценариями А2 и В2 увеличиваются к концу XXI века и носят систематический характер. Все приводимые ниже оценки изменений климата, если это не оговаривается особо, получены для сценария В2. Далее по тексту мы упоминаем сценарий А2 лишь в тех случаях, когда нам нужно сравнить между собой оба сценария. Как отмечалось выше, все изменения климата в XXI веке получены по отношению к базовому климатическому периоду 1981-2000 гг.

### **Изменения температуры воздуха у поверхности земли**

Среднее глобальное потепление климата по ансамблю из 7 моделей МГЭИК составляет 1,3°C к середине XXI века (2041-2060 гг.) и 2,1°C к его концу (2080-2099 гг.). Неопределенность оценок потепления, обусловленная разной реакцией моделей климата на одинаковое радиационное воздействие, характеризуется среднеквадратическим отклонением глобальной температуры воздуха отдельных моделей от среднего значения по ансамблю и составляет 0,2 и 0,4°C соответственно для середины и конца столетия. Таким образом, изменение средней глобальной температуры намного превышает среднюю дисперсию по ансамблю моделей.

На рис. 3 показаны средние по ансамблю сезонные изменения температуры воздуха у поверхности земли на территории России и сопредельных регионов. Из-за большой географической протяженности термический режим на территории России в разные сезоны изменяется в достаточно широких пределах. На фоне общего глобального потепления климата наибольшее повышение приземной температуры в XXI веке отмечается в холодное время года в Сибири и на Дальнем Востоке. Так, повышение температуры вдоль побережья Северного Ледовитого океана составляет  $4^{\circ}\text{C}$  в середине века и  $7-8^{\circ}\text{C}$  в его конце. Среднее по ансамблю потепление на всей территории России также значительно превышает дисперсию, характеризующую разброс в оценках потепления между отдельными моделями. В табл. 2 приводятся изменения зимней, летней и среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли для рассматриваемых водосборов.

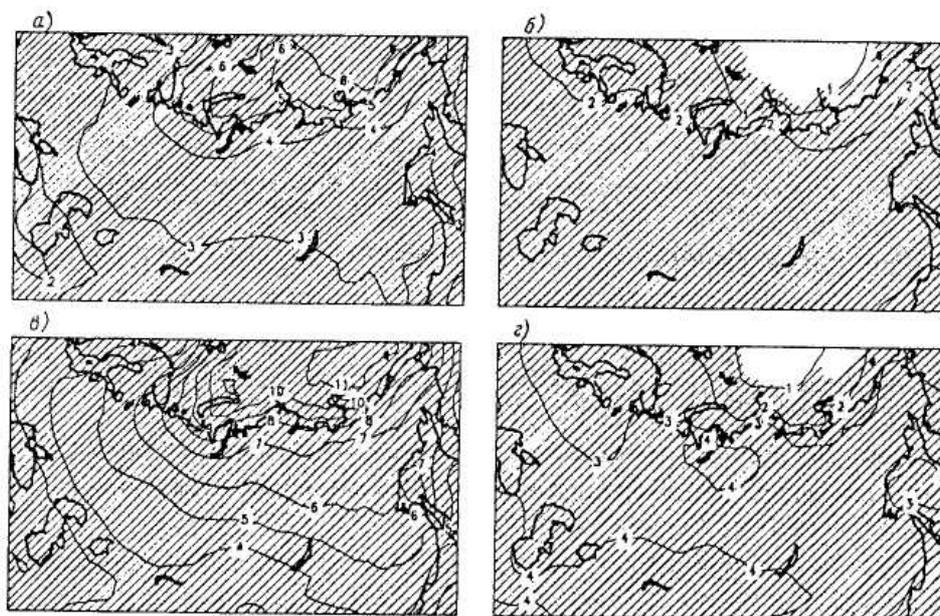


Рис. 3. Распределения изменений температуры воздуха у поверхности земли ( $^{\circ}\text{C}$ ) зимой (а, в) и летом (б, г) в Северной Евразии в середине (а, б) и к концу (в, г) XXI века по отношению к базовому периоду 1981-2000 гг., рассчитанные по ансамблю моделей климата для сценария эмиссии В2.

Выделены области, в которых изменения температуры по ансамблю превышают среднеквадратические отклонения между моделями.

В случае реализации сценария А2 следует ожидать дополнительного по сравнению с В2 повышения температуры на 10-20 % к середине столетия и на 40-60% к его концу на всех водосборах как зимой, так и летом. На всех рассматриваемых водосборах рост температуры воздуха у поверхности земли получился значимым, начиная с первой половины XXI столетия.

Таблица 2

Изменения температуры воздуха у поверхности земли зимой, летом и в среднем за год в середине и конце XXI столетия на водосборах Северной Евразии по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг., полученные по ансамблю из 7 моделей для сценария эмиссии В2

Водосбор	2041—2060 гг			2080—2099 гг		
	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
Балтика	2,2	1,7	2,0	3,8	2,5	3,1
Печора	3,2	1,9	2,4	5,3	2,8	3,9
Днепр	2,1	2,3	2,1	3,3	3,2	3,1
Волга	2,4	2,2	2,2	3,8	3,0	3,5
Обь	2,5	2,3	2,5	4,0	3,5	3,9
Енисей	2,6	2,3	2,5	4,0	3,5	3,8
Лена	3,0	2,1	2,6	5,0	3,2	4,1

### Изменения осадков

Средние по ансамблю моделей оценки глобального роста среднегодовых осадков составляют 1,8 и 2,9 % соответственно для середины и конца XXI столетия при сценарии эмиссии парниковых газов В2. На рис. 4 показаны изменения осадков на территории России зимой и летом к середине и концу XXI столетия. Среднегодовой рост осадков на всей территории России значительно превышает указанные глобальные изменения. При этом на многих российских водосборах осадки возрастают не только зимой, но и летом (см. табл. 3). Однако в теплое время года их рост оказывается заметно меньшим и наблюдается, в основном, в северных регионах, в Сибири и на Дальнем Востоке. При этом летом усиливаются преимущественно конвективные осадки, что неявно указывает на возможность увеличения повторяемости ливней и связанных с ними экстремальных режимов погоды.

Летом в южных регионах европейской территории России и на Украине происходит уменьшение осадков. Отношение средних изменений осадков к их дисперсии, рассчитанной по ансамблю моделей для отдельных сезонов и в среднем за год, оказывается заметно меньшим соответствующего отношения для температуры воздуха и превышает единицу только в отдельных регионах России. Это означает, что достоверность модельных оценок изменения осадков меньше, чем для приземной температуры воздуха. Вместе с тем для большинства рассматриваемых водосборов среднегодовые изменения осадков с 10-летним скользящим осреднением оказываются статистически значимыми, начиная с середины XXI столетия.

Зимой на европейской части России и в ее южных регионах увеличивается доля жидких осадков, а в Восточной Сибири и на Чукотке - твердых. Результатом этого является уменьшение массы накопленного за зиму снега на западе и юге России и соответственно дополнительное накопление снега в Центральной и Восточной Сибири (рис. 5).

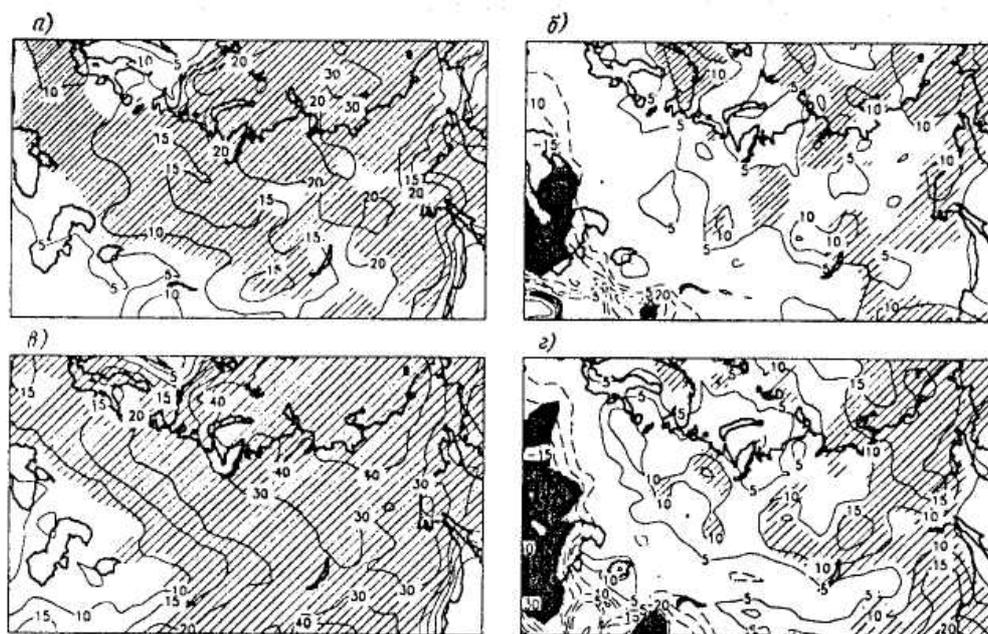


Рис. 4. То же, что рис. 3, но для изменения осадков (%) по отношению к их количеству при современном климате, т. е. за контрольный период 1981-2000 гг.

При расчетах по сценарию А2 зимой осадки возрастут еще на 10 % по сравнению со сценарием В2 к концу столетия на большинстве водосборов России, а летом уменьшатся на водосборах Балтика, Волга, Обь и Днепр, причем на последнем водосборе это уменьшение будет наибольшим и составит 15 %.

### Изменения баланса воды в почве

При потеплении климата вместе с ростом осадков в теплое время года усиливается испарение с поверхности суши, что приводит к заметному уменьшению влагосодержания деятельного слоя почвы и стока на всей рассматриваемой территории. Рассмотрим уравнение водного баланса деятельного слоя почвы

$$\frac{\partial W}{\partial t} + R_n = P - E.$$

Здесь  $dW/dt$  характеризует изменение содержания воды в деятельном слое почвы;  $R_n$  — суммарный сток;  $P$  — осадки;  $E$  — испарение.

Для среднегодовых условий суммарный сток определяется из соотношения

$$R_n = P - E.$$

Для анализа изменений водного баланса деятельного слоя почвы помимо данных об осадках мы располагали среднемесячными данными об испарении для пяти моделей (данные моделей РСМ и СSI отсутствовали) и только для сценария В2. По известной разности  $P - E$ , рассчитанной для современного климата и климата XXI столетия, из уравнения (1) можно определить суммарное изменение влагосодержания слоя почвы и стока, которые, как правило, имеют один и тот же

знак (т. е. при уменьшении влажности почвы происходит уменьшение и суммарного стока и наоборот).

Таблица 3  
Изменения осадков зимой, летом и в среднем за год в середине и конце XXI столетия на водосборах Северной Евразии (проценты по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг.)

Водосбор	2041–2060 гг.			2080–2099 гг.		
	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
Балтика	7,4	0,2	4,5	11,5	1,7	8,7
Печора	13,5	3,9	7,4	18,2	3,8	12,6
Днепр	7,2	-3,4	2,8	10,8	-6,3	3,7
Волга	9,3	0,0	5,4	12,3	2,6	8,9
Обь	11,7	1,3	6,8	16,9	2,0	10,2
Енисей	14,0	5,8	7,8	22,4	5,2	11,9
Лена	15,2	5,4	9,4	24,2	9,0	15,0

Расчеты показывают, что в регионах, свободных от снежного покрова, тенденция к уменьшению влагосодержания почвы обнаруживается уже весной. Это уменьшение становится более заметным с наступлением лета на всей территории России и сопредельных регионов. На рис. 6 приводятся изменения разности осадки минус испарение, нормированные на осадки, полученные за контрольный период (1981–2000 гг.), летом на территории России и сопредельных регионов в середине и в конце XXI столетия ( $\Delta(P - E)/P_0$ ). На рисунке видно, что летом почвенная влага и суммарный сток уменьшаются (в некоторых регионах незначительно), что должно способствовать формированию более засушливых условий, особенно в южных регионах. Из данных табл. 4 следует, что для разных водосборов рост дефицита влаги (уменьшение отношения  $\Delta(P - E)/P_u$ ) в почве летом изменяется в диапазоне 1-11 %.

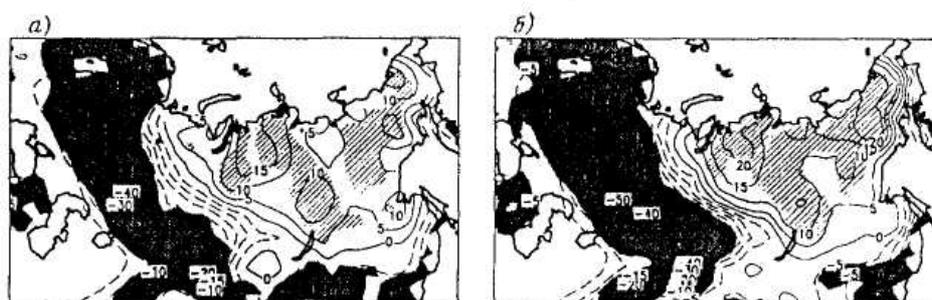


Рис. 5. Изменение накопленной за зимний период массы снега к началу марта ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) в середине (а) и конце (б) XXI столетия при сценарии эмиссии В2

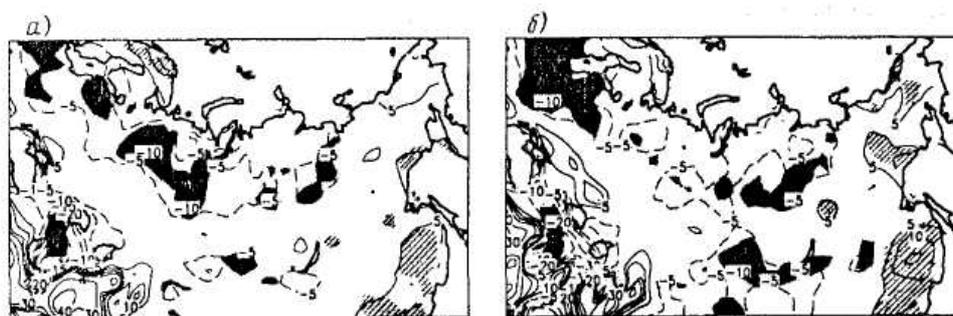


Рис. 6. Изменения (%) отношения  $\Delta(P - E)/P$ , (Л) рассчитано за контрольный период 1981—2000 гг.) летом на территории России и сопредельных регионов в середине (а) и в конце (б) XXI столетия. Области, в которых отношение  $\Delta(P - E)/P$  превышает среднеквадратическое отклонения между моделями, заштрихованы, а там, где соответствующее отношение меньше -1, затемнены.

### Изменения речного стока

Рост среднегодовых осадков при потеплении климата приводит к заметному увеличению стока на большинстве водосборов (табл. 4). Исключением являются лишь водосборы южных рек (Днепр), на которых к концу XXI столетия годовой сток сокращается примерно на 6 %. Поскольку летом сток убывает на всех водосборах, его среднегодовой рост обеспечивается положительным балансом воды ( $P - E$ ) в течение трех других сезонов особенно весной, когда происходит таяние снега, накопленного за весь зимний период.

Таблица 4

Изменения (проценты по отношению к летним осадкам и к среднему за год стоку за базовый период 1981—2000 гг.) влажности почвы и суммарного стока летом и среднего за год стока на основных водосборах Северной Евразии, полученные для середины и конца XXI столетия

Водосбор	Влажность почвы и суммарный сток летом		Средний за год сток	
	2041-2060 гг.	2080-2099 гг.	2041-2060 гг.	2080-2099 гг.
Балтика	-4,1	-5,9	1,9	5,7
Печора	-5,1	-10,8	4,4	13,5
Днепр	-1,4	-2,8	-3,3	-6,2
Волга	-3,9	-2,0	2,2	6,2
Обь	-7,3	-7,0	0,6	4,3
Енисей	-3,9	-4,9	4,8	10,2
Лена	-0,4	-0,1	10,8	17,5

На рис. 7 показана эволюция в XXI веке среднего за год стока, рассчитанного по ансамблю из 5 моделей МГЭИК, для 4 водосборов. Кривыми представлены средние по ансамблю изменения стока по отношению к базовому климату, сглаженные с помощью 10-летнего скользящего осреднения. Разброс модельных оценок характеризует выделенная серым цветом область, в которую попадают 75 % средних модельных значений (зона между процентилями 12,5 и 87,5). Две прямые (пунктир здесь и ниже, на рис. 8) обозначают

границы интервала естественной изменчивости, в который теоретически должны попадать 95 % 10-летних модельных средних, при сохранении статистической структуры изменчивости базового климата [44]. Таким образом, если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения статистически значимы на 5 %-ном уровне. На всех водосборах наблюдается значительный разброс оценок изменений стока в ансамбле, в результате только на трех водосборах (Печора, Енисей и Лена) рост стока оказался статистически значимым, начиная со второй половины XXI века.

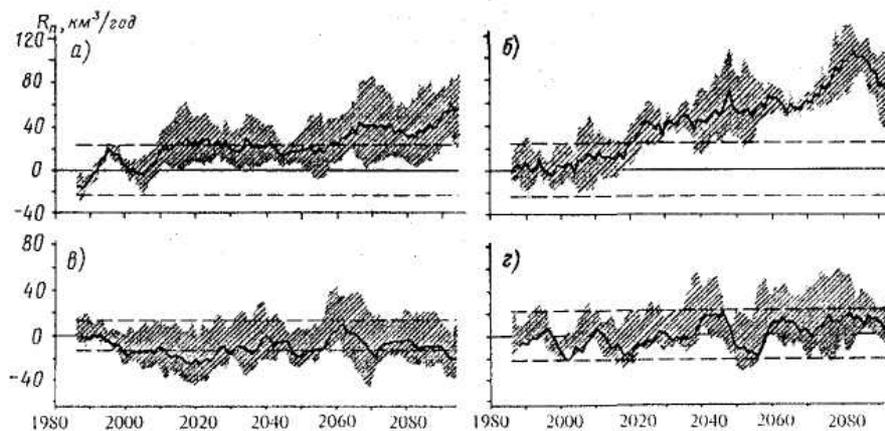


Рис.7. Изменения среднего за год стока ( $\text{км}^3/\text{год}$ ) в XXI веке на водосборах Печора (а), Лена (б), Днепр (в) и Волга (г)

Как известно, на водосборах в средних широтах максимальный сток наблюдается весной - в период интенсивного таяния снега. Рассмотрим возможные изменения величины и времени наступления весеннего максимума стока при потеплении климата. Поскольку в начале весны деятельный слой почвы, как правило, оказывается насыщенным влагой, основная масса растаявшего снега расходуется на сток. К сожалению, мы не располагали данными о среднемесячных значениях стока по всем или хотя бы по большинству моделей МГЭИК. Но в нашем распоряжении имелись среднемесячные данные о водном эквиваленте снежного покрова, полученные для шести моделей (данные модели РСМ отсутствовали). Рассчитав среднемесячные изменения массы снега с марта по май для середины и конца столетия, по отношению к соответствующим изменениям в базовом климате (табл. 5), мы получили среднемесячные изменения стока, обусловленные таянием снежного покрова. На величину стока оказывают влияние два фактора: увеличение скорости таяния снега в результате потепления климата и изменение накопленной за зиму массы снега. Результаты расчетов показывают, что на водосборах Днепр и Волга происходит уменьшение весеннего максимума стока в XXI веке вследствие уменьшения массы накопленного за зиму снега и более раннее его наступление при потеплении климата. На водосборах Балтика, Печора и Обь, несмотря на некоторое уменьшение массы снега к началу весны, сток заметно возрастает к середине столетия в результате более быстрого таяния снега. Однако к концу столетия этот сток уменьшается, поскольку важную роль начинает играть убывание накопленной за зиму массы снега. Совершенно другая ситуация складывается в Сибири. Так, на водосборах Енисей и Лена в XXI веке происходит заметное увеличение накопленной за зиму массы снега, что приводит к существенному росту стока из-за интенсификации его таяния в период с апреля по май.

Таблица 5  
Изменения (проценты по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг.) массы растаявшего снега весной (март — май) на основных водосборах Северной Евразии, полученные для середины и конца XXI столетия

Водосбор	2041—2060 гг.	2080—2099 гг.
Балтика	5,7	-4,8
Печора, Северная Двина	19,6	7,7
Днепр, Дон	-17,1	-32,7
Волга, Урал	-12,0	-18,2
Обь	11,2	5,7
Енисей	25,3	47,0
Лена	36,8	60,4

На рис. 8 показаны изменения массы тающего снега на четырех водосборах, рассчитанные по ансамблю из шести моделей. Несмотря на значительный разброс в расчетах, рост весеннего стока за счет растаявшего снега оказывается статистически значимыми для водосборов Енисей и Лена уже в первой половине XXI века. Таким образом, вероятность крупных весенних паводков на этих водосборах существенно возрастает.

### Изменения площади морского льда в Арктике

Изменениям климата Арктики в XXI веке, рассчитанным по моделям МГЭИК в рамках проекта АСИА, посвящена отдельная работа [2]. Здесь мы приводим результаты оценок возможных в будущем изменений арктического морского льда, который традиционно рассматривается как один из ключевых индикаторов и факторов антропогенного потепления. К сожалению, в нашем распоряжении имелись результаты расчетов площади морского льда лишь для пяти моделей МГЭИК (CGC, CSM, ECH, GFD и HAD) и только для одного сценария эмиссии (B2).

Все модельные расчеты указывают на сокращение площади морского льда на протяжении XXI века, однако эти изменения немонотонны и характеризуются значительной межгодовой и пространственной изменчивостью. Количественные оценки изменений площади морского льда существенно затруднены тем, что модели демонстрируют значительный разброс в расчетах современного состояния ледяного покрова океана. Например, для марта, когда в Северном полушарии наблюдается максимальная площадь морского льда, разброс между модельными оценками площади льда составляет от 9 до 16 млн. км<sup>2</sup> (согласно данным наблюдений, в последнее десятилетие морской лед в марте покрывает площадь приблизительно 14 млн. км<sup>2</sup> [38]). Еще больший разброс существует в модельных расчетах ледяного покрова океана для сентября (минимального по площади в Северном полушарии) - от 2 до 11 млн. км<sup>2</sup> (соответствующая наблюдаемая величина составляет 5-6 млн. км<sup>2</sup> [38]).

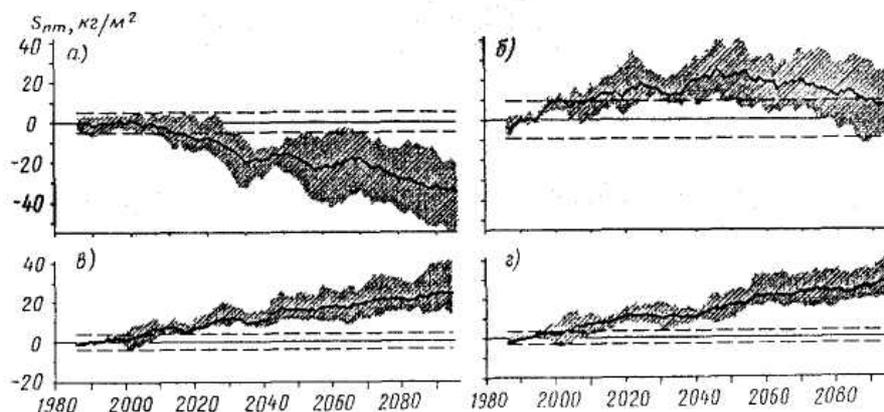


Рис. 8. Временной ход стаявшей массы снега ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) за период март XX — март XXI столетий по отношению к периоду 1981-2000 гг. на водосборах рек Волга (а), Печора (б), Енисей (в) и Лена (г) с 10-лстним скользящим усреднением по ансамблю из 6 моделей при сценарии эмиссии B2

В среднем по ансамблю из пяти моделей сокращение площади морского льда в Северном полушарии к концу XXI века составляет 2,5 млн.  $\text{км}^2$  в марте (при разбросе между оценками моделей от 2 до 3 млн.  $\text{км}^2$ ) и приблизительно столько же в сентябре (при еще большем разбросе модельных оценок). По расчетам одной из моделей (CGC), начиная со второй половины XXI века, ледяной покров океана в Северном полушарии становится сезонным, так что в конце лета Арктический бассейн полностью освобождается ото льда.

На рис. 9 представлены полученные по 5 моделям пространственные распределения морского льда в марте и сентябре для базового климата и последнего двадцатилетия XXI века. В каждой ячейке сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  различными оттенками серого цвета показано число моделей, в которых для этой ячейки получен лед. Черным цветом обозначены ячейки, для которых во всех моделях наличествует лед. Как уже отмечалось, наиболее заметные различия с современным климатом получены при расчете ледяного покрова океана в сентябре.

Можно предположить, что в случае реализации сценария эмиссии A2 во второй половине XXI века произойдут еще более значительные сокращения площади морского льда.

Влияние вышеописанных изменений ледяного покрова океана на экосистемы и деятельность человека неоднозначно. Например, изменения среды обитания могут привести к весьма негативным последствиям для некоторых видов фауны, жизнедеятельность которых связана с морским льдом. В то же время новые перспективы для обороны и экономики России могут открыться в связи с облегчением ледовой обстановки в арктических морях, в частности - с увеличением продолжительности навигационного периода. Кроме того, могут улучшиться условия для экономического освоения арктических шельфов (добычи полезных ископаемых, рыбного промысла и т. п.), а также для туристического бизнеса.

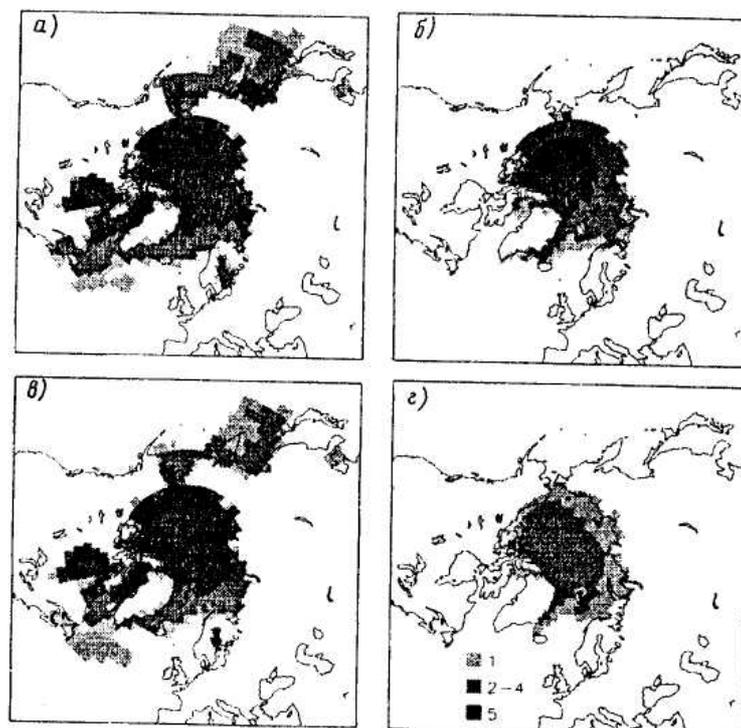


Рис.9. Пространственное распределение морского льда в марте (а, в) и сентябре (б, г), полученные по расчетам пяти моделей для современного климата (1981-2000 гг.) (а, б) и конца XXI столетия (2081—2099 гг.) (в, г) при сценарии эмиссии В2. Пояснения приведены в тексте.

### Изменения сезонного протаивания грунтов в зоне вечной мерзлоты

При постановке задачи об изменении параметров вечной мерзлоты (ВМ) под влиянием изменения климата следует иметь в виду, что границы распространения ВМ на материках являются весьма условными. При определении перемещения границ области, занятой ВМ, речь идет не о полном исчезновении толщ реликтовой ВМ, а лишь о появлении талой прослойки грунта между верхним слоем его зимнего промерзания и реликтовой частью толщи мерзлоты. Среди характеристик ВМ наибольший интерес в контексте вопросов изменений климата представляет толщина слоя сезонного протаивания грунтов, так как, во-первых, состояние самых верхних слоев грунта в наибольшей степени чувствительно к изменениям климата, а, во-вторых, только в этих слоях могут проявиться обратные связи. Кроме того, толщина слоя сезонного протаивания чрезвычайно важна во многих областях хозяйственной деятельности.

Глубины сезонного протаивания существенно зависят от свойств грунтов и видов растительного покрова. Поэтому в естественных условиях распределения глубин протаивания имеют мозаичный характер в соответствии с особенностями ландшафта. В связи с этим для анализа климатических воздействий на сезонное протаивание использовалось предположение об однородности грунтов и растительных покровов по всей рассматриваемой территории, а сами расчеты выполнялись в вариантах такого распределения для органических (торфяники) и минеральных (суглинки и пески) грунтов при наличии и отсутствии растительного покрова.

Приведенные ниже результаты расчетов соответствуют условиям суглинистых грунтов с лишайниковым покровом.

В отличие от обсуждавшихся выше некоторых параметров климата характеристики ВМ не могли быть получены непосредственно из расчетов по моделям МГЭИК, так как эта часть криосферы в них крайне упрощена или вообще отсутствует. Поэтому расчет характеристик протаивания выполнялся с помощью одномерной многоуровневой модели теплопередачи в грунтах, построенной с учетом фазовых переходов влаги при наличии снежного и растительного покровов [6, 31]. Входными параметрами схемы являются: температура на верхней границе расчетной области, совпадающей с верхней границей растительного или снежного покрова, и толщина последнего. В узлах регулярной сетки решается многослойная задача теплообмена в конечной области с учетом различия теплофизических характеристик в слоях снега, растительности и грунта. Отыскивается решение уравнения теплопроводности в области, на нижней границе которой задан геотермальный поток тепла, а на верхней - годовой ход температуры и высота снежного покрова. В области фазовых переходов вводится эффективная теплоемкость среды. Используется схема решения с переменным шагом сетки по вертикали (всего 60 уровней до глубины 30 м).

В качестве информации о современном климате использованы данные реанализа NCEP/NCAR. На рис. 10 показаны глубины протаивания для условий современного климата. Для расчета будущих изменений глубины протаивания использовались данные МОЦАО (см. табл. 1) для двух сценариев потепления климата — В2 и А2. На рис. 10б приведены распределения изменений глубин сезонного протаивания в середине и конце XXI века, полученных по ансамблю моделей для сценария В2. В середине века большая часть рассматриваемой территории относится к зоне изменений глубин протаивания в пределах от 20 до 40 см, в конце века - к зоне изменений в пределах от 40 до 80 см. В Средней Сибири максимальные отклонения глубин протаивания от современных значений составляют 100-120 см в середине века. Отметим, однако, что при реализации сценария В2 даже в конце века на Крайнем Севере сохраняется область изменений глубин протаивания, не превышающих 20 см.

Границы зон изменения глубин протаивания имеют широтный характер. Величина смещения границ этих зон составляет от 100 до 250 км. Рисунок позволяет установить, в какой области может предположительно произойти смена режима сезонного протаивания на режим сезонного промерзания в результате отрыва кровли реликтовой ВМ от поверхности.

Анализ показывает, что во всей рассматриваемой области, по крайней мере, в середине века, разброс глубин протаивания, обусловленный различием моделей, меньше средней величины, оцениваемой по ансамблю моделей. Полученные изменения глубин протаивания - особенно в случае реализации сценария А2 (рисунок не показан) - являются весьма существенными и могут привести к значительным повреждениям существующих инженерных сооружений. При проектировании новых сооружений следует принимать во внимание возможные отклонения параметров ВМ от современных значений. Вместе с тем увеличение глубин протаивания может обеспечить улучшение условий земледелия в северных регионах и создать предпосылки к смещению растительных зон.

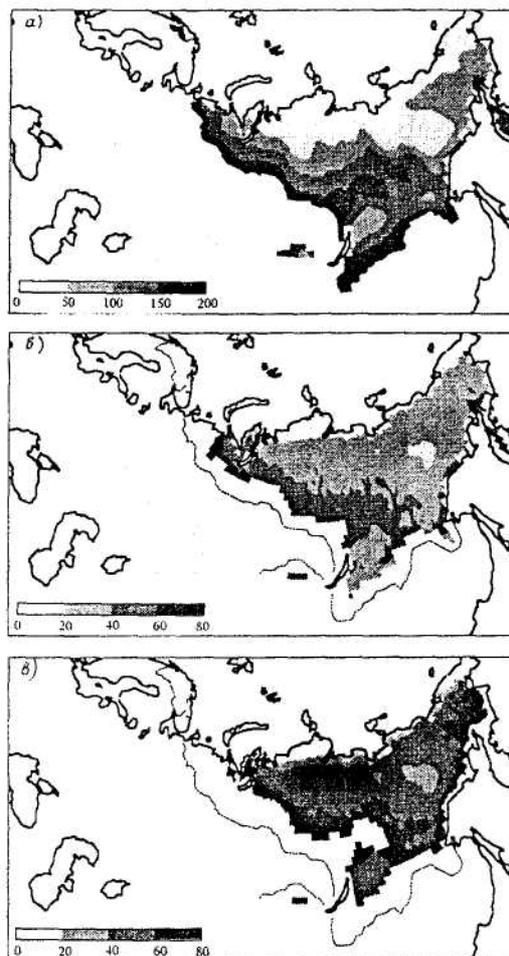


Рис. 10. Глубины протаивания для условий современного климата

## Заключение

Вследствие значительной протяженности России и сопредельных с ней территорий современный климат этого региона отличается чрезвычайно большим разнообразием. Кроме того, в ряде исследований показано, что климат здесь оказывается достаточно чувствительным к увеличению содержания парниковых газов в атмосфере. По этой причине оценка его возможных изменений в XXI веке в результате антропогенного воздействия представляет большое научное и практическое значение.

В настоящем исследовании впервые выполнена оценка изменений климата на крупных водосборах России по ансамблю физически полных МОЦАО для сценариев МГЭИК роста содержания парниковых газов и аэрозоля в атмосфере A2 и B2.

Анализ показывает, что потепление климата и связанное с ним увеличение осадков на водосборах России в XXI столетии существенно превышает среднеглобальные значения, особенно зимой. Несмотря на рост осадков летом, на большей части территории России формируются более засушливые условия по сравнению с современными. Это особенно выражено на южных и западных водосборах и вызвано более ранним таянием снега и увеличением испарения с подстилающей поверхности. При потеплении климата ожидаются значительные изменения гидрологического режима на подстилающей поверхности, обусловленные

влиянием криосферных процессов. На водосборах европейской части России и в южных регионах Западной Сибири масса снега, накапливаемая за зиму, уменьшается. Поэтому максимум весеннего стока уменьшается и наступает раньше на один месяц к концу столетия. На водосборах Центральной и Восточной Сибири накопленная масса снега зимой увеличивается, и максимум весеннего стока в результате его таяния также возрастет. В результате увеличивается вероятность появления крупных весенних паводков на этой части территории России.

Потепление климата приведет к сокращению ледяного покрова океана в Северном полушарии, особенно летом, и увеличению глубины протаивания вечномерзлых грунтов, особенно в обширной зоне, примыкающей к южной границе вечной мерзлоты.

Рост температуры у поверхности земли на всей территории России, рассчитанный по ансамблю моделей, оказался намного больше, чем разброс между отдельными моделями, что повышает достоверность ансамблевых оценок. С другой стороны, при расчетах осадков и стока модели показывают большой разброс оценок для многих регионов России, что снижает их достоверность.

Для повышения качества оценок будущих изменений климата требуется дальнейшее совершенствование МОЦАО, использование большего числа членов в ансамбле и более широкого набора климатически важных характеристик (в том числе, более высокого временного разрешения), позволяющих оценивать изменения не только средних значений, но и повторяемости экстремальных режимов.

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ (НИР «Климат полярных регионов России в XXI веке как фактор развития Северного морского пути и освоения Севера»), Российской федеральной целевой программы «Мировой океан» и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-05-65242, 02-05-64929, 03-05-64955, 03-05-65200, 03-05-64764, НШ-1845.2003.5).

## Литература

1. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2003, т. 39, № 2, с. 150-165.
2. Катцов В.М., Вавулин С.В., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Сценарии изменений климата Арктики в XXI веке. // Метеорология и гидрология, 2003, № 10, с. 5-19.
3. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Володин Е.М. и др. Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1998, т. 34, № 4, с. 5-11.
4. Мелешко В.П., Голицын Г.С, Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей. // Метеорология и гидрология, 2004, № 4, с. 38—49.
5. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. - Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 638 с.
6. Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Шкляревич О.Б. Модельные оценки влияния растительного покрова на деградацию вечной мерзлоты при потеплении климата. // Метеорология и гидрология, 2003, № 3, с 87—95.
7. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2003, т. 39, №2, с. 150-165.

8. Павлова Т.В., Мелешко В.П., Говоркова В.А. Характеристики теплового и водного баланса на водосборах крупных рек в модели атмосферы ГГО, рассчитанные в рамках международного проекта сравнения моделей атмосферы AMIP-I и AMI P-II // Труды ГГО, 2001, вып. 550, с. 85-109.
9. Спорышев П.В., Павлова Т.В., Мелешко В.П. и др. Влагооборот бассейна Каспийского моря, наблюдаемый и рассчитанный по моделям общей циркуляции атмосферы // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Ред. И. А. Шикломанов и А. С. Васильев. – СПб: Гидрометеиздат, 2003, с.6-23.
10. Aagaard K. and Carmack E. C. The role of sea ice and other fresh waters in the Arctic circulation // *J. Geophys. Res.*, 1989, vol. 94, pp. 14485-14498.
11. AC I A, 2000. Arctic Climate Impact Assessment (ACIA): An Assessment of Consequences of Climate Variability and Change and the Effects of Increased UV in the Arctic Region. - Implementation Plan. Version 3.7. Prepared by the Assessment Steering Committee, 37 p.
12. Anisimov O., Fitzharris B., Hagen J.O., et al. Polar Regions (Arctic and Antarctic). /In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. J-McCarthy, O.F. Canziani, et al. (eds.).—Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2001, 1032 p.
13. Boer G. J. Analysis and verification of model climate. /In: *Numerical Modeling of the Global Atmosphere in the Climate System*. P. Mote and A. O'Neill (eds.). - NATO Science Series C-550, Kluwer Academic Publishers, 2000, 517 p.
14. Boville B.A., Kiehl J.T., Rasch P.I. and Bryan F.O. Improvements to the NCAR CSM-1 for transient climate Simulations. // *J. Climate*, 2001, vol. 14, pp. 164-179.
15. Cubasch U., Meehl G. A., Boer G. J., et al. Projections of future climate change. // *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. T. Houghton, Ding Y., et al. (eds.). - Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2001, 881 p.
16. Delworth T.L., Stouffer R.J., Dixon K.W., et al. Simulation of climate variability and change by the GFDL R30 coupled climate model. // *Climate Dynamics*, 2002, vol. 19, pp. 555-574.
17. Flato G.M. and Boer G.J. Warming asymmetry in climate change experiments. // *Geophys. Res. Lett.*, 2001, vol. 28, pp 195-198.
18. Folland C.K., Karl T.R., Christy J.R., et al. Observed climate variability and change. // *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.T. Houghton, Ding Y., et al. (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2001, 881 p.
19. Gates W. L. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1992, vol. 73, pp. 1962-1970.
20. Gordon H.B., Cooper C, Senior C. A. et al. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. // *Climate Dynamics*, 2000, vol. 16, pp. 147-168.
21. Gordon H.B. and O'Farrell S.P. Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice // *Mon. Wea. Rev.*, 1997, vol. 125, pp. 875-907.
22. Graham R.J., Evans A.D.L., Mynne K. R., et al. An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models. // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2000, vol. 126, pp. 2211–2240.
23. Hagemann S. and Dumenil L. Development of a parameterization of lateral discharge for the global scale. - Max-Planck Institute fur Meteorologie, 1996, Rep. No. 219, 32 p.
24. Huffman G. J., Adler R. F., Rudolf B., et al. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis and NWP model precipitation estimates. // *J. Climate*, 1995, vol. 8, pp. 1284-1295.

25. IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, Ding Y., et al. (eds.). - Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881 p
26. IPCC-TGCI, 1999: Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. /Prepared by T. R. Carter, M. Hulme, and M.Lai. - Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69 p.
27. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. // Bull. Amer. Meteorol. Soc, 1996, vol. 77, pp.437-471.
28. Kattsov V.M., Walsh J.E., Rinke A., and Dethloff K. Atmospheric climate models: Simulation of the Arctic Ocean fresh water budget components. // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean. E.L. Lewis (ed.). - Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 2000, pp. 209-247.
29. Krishnamurthi T.N., Kishtawal C.M. et al. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate // J. Climate, 2000, vol. 13, pp. 4196-4216.
30. Legates D.R. and Willmott C.L. Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature. // Theor. Appl. Clim., 1990, vol. 41, pp. 209-247.
31. Malevsky-Malevich S.P., Molkentm E.K., Nadyozhina E.P., and Shklyarevich O.B. Numerical simulation of permafrost parameters distribution. // Cold. Reg. Sci. and Tech., 2001, vol.32, pp. 1-11.
32. McAvaney B.J., Covey C., Joussaume S., et al. Model evaluation. // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. T. Houghton, Ding Y., et al. (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881 p.
33. Meehl G.A., Boer G.J., Covey C., et al. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). // Bull. Amer. Meteorol. Soc, 2000, vol. 81, pp. 313-318.
34. Mysak L., Manak D.K., and Mardsen R. F. Sea ice anomalies observed in the Greenland and Labrador seas during 1901—1984 and their relation to an interdecadal climate cycle. - Climate Dynamics, 1990, vol. 5, pp. 111-113.
35. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., et al. IPCC Special Report on Emission Scenarios. - Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 599 p.
36. National Assessment Synthesis Team. Climate, Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change. Report for the US Global Change Research Program, 2001. - Cambridge, UK, Cambridge University Press, 620 p.
37. Palmer T. N. and Anderson D. L. T. The prospects for seasonal forecasting - A review paper. // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc, 1994, vol. 120, pp. 756—793.
38. Parkinson C.L., Cavalieri D.J., Gloersen P., et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends. // J. Geophys. Res., 1999, vol. 104, pp. 20837-20856.
39. Roeckner E., Oberhuber J.M., Bacher A., et al. ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. // Climate Dynamics, 1996, vol. 12, pp. 737-754.
40. Smith J. B., Hulme M., Jaagus J., et al. Climate change scenarios. // Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies. J.F. Feenstra, I. Burton, J. Smith, and R.S.J. Tol (eds.). Version 2.0. United Nations Environment Programme and Institute for Environmental Studies. - Amsterdam, Vrije Universiteit, 1998, pp. 3-40
41. SRES, 2000. Emission Scenarios. Summary for Policymakers.- IPCC Special Report of Working Group III. WMO/UNEP, 2000, 20p.
42. Stocker T.F., Clarke G.K.C., Le Treut H., et al. Physical Climate Processes and Feedbacks. // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. J.T. Houghton, Ding Y., et al. (eds.). - Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881 p.

43. Trenberth K.E., Karl T.R., and Spence T.W. The need for a system approach to climate observations. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, vol. 83, pp. 1593-1602.
44. von Storch H. and Zwiers F.W. *Statistical Analysis in Climate Research*. - Cambridge, Cambridge University Press, 1999, 484 p.
45. Walsh J.E., Kattsov V., Chapman W., et al. Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models. // *J. Climate*, 2002, vol. 15, pp. 1429-1446.
46. Walsh J. E., Kattsov V., Portis D., and Meleshko V. Arctic precipitation and evaporation: model results and observational estimates. // *J. Climate*, 1998, vol. 11, pp. 72-87.
47. Washington et al. Parallel Climate Model (PCM): Control and Transient simulations. // *Clim. Dyn.*, 2000, vol. 16, pp. 755-774.

**Публикации Тренингового центра МКВК, вып. 12**  
**Изменение климата: что говорит наука**

Составитель - Стулина Г.В.  
Редактор - Ананьева Н.Д.  
Верстка и макет – Турдыбаев Б.К.  
Дизайн серии - Беглов И.Ф.

**Предыдущие выпуски серии**

- № 1 Экологические попуски, 2003
- № 2 Всемирный Водный Совет, 2004
- № 3 Совершенствование управления водными ресурсами в США, 2004
- № 4 Международная комиссия по ирригации и дренажу, 2004
- № 5 Экологическое управление: мировой опыт, 2004
- № 6 Кое-что о воде Канады, 2004
- № 7 Устойчивое управление подземными водами: концепции и инструменты, 2004
- № 8 Стратегическое планирование и устойчивое управление развитием водных ресурсов в Центральной Азии, 2004
- №9 Водные ресурсы Японии, 2005
- №10 Учет гендерных факторов при управлении водными ресурсами. Реальный путь к устойчивости: руководство ПРООН по ресурсам, 2005
- №11 Изменение климата: касается каждого, 2005

Подготовлено к печати и отпечатано  
в Научно-информационном центре МКВК

Республика Узбекистан, 700 187, г. Ташкент,  
м-в Карасу-4, д. 11, НИЦ МКВК

[www.sic.icwc-aral.uz](http://www.sic.icwc-aral.uz)

Предложения и замечания просим направлять по адресу

[info@icwc-aral.uz](mailto:info@icwc-aral.uz)