

УДК 551.583.16

**В.Н. Хохлов**, д.геогр.н.

*Одесский государственный экологический университет*

## **КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ЕВРОПЫ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА**

*Описывается методика расчета совокупного индекса изменения климата, учитывающего аномальные события температуры и осадков. Метод применяется для территории Европы. Показано, что наибольшие изменения климата в 1978-2006 гг. имели место в Центральной Европе, западной и центральной частях Средиземного моря и на Пиренейском полуострове.*

**Ключевые слова:** *изменение климата, аномалии, температура, осадки.*

### **Введение**

По определению, изменение климата означает статистически значимую вариацию либо среднего его состояния или его изменчивости, сохраняющуюся в течение продолжительного периода времени (обычно десятилетия или более того), и которое может быть вызвано естественными внутренними процессами или внешними воздействиями, или постоянными антропогенными изменениями в составе атмосферы или землепользовании. Сам климат в узком смысле определяется, как статистическое описание с точки зрения средних значений и изменчивости соответствующих количественных показателей (в большинстве случаев, приземной температуры, осадков и т.д.) за период времени от нескольких месяцев до тысяч или миллионов лет, а в более широком смысле – как состояние климатической системы, состоящей из пяти основных компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, земной поверхности и биосферы [1]. Поэтому если рассматривать климат именно в широком смысле, для описания его изменений необходимо учесть (в отдельности или вместе) большое количество параметров, некоторые из которых могут оказаться с точки зрения изменчивости более показательными, а другие – менее.

При рассмотрении изменений климата в XX веке наиболее часто используемым параметром, вследствие своей наглядности, является тренд глобальной температуры, которая за последние 100 лет выросла на  $0,74 \pm 0,18$  °C, причем, вероятнее всего, большая часть этого потепления связана с антропогенным воздействием. Это потепление, в свою очередь связано с увеличением уровня моря и уменьшением площади снежного покрова в Северном полушарии [2]. С другой стороны, даже на протяжении последних 30 лет, когда темпы потепления были особенно велики, в некоторых регионах земного шара (например, Южная Атлантика, Аляска и т.д.) наблюдалось похолодание. Более того, при общем повышении температуры и на фоне увеличивающегося количества годовых осадков над Евразией в целом, над восточной частью Азии наблюдалось уменьшение осадков [1]. То есть, изменения этих двух показателей климата, в целом, не связаны между собой, что объясняется сложностью процессов протекающих в глобальной климатической системе. Все это свидетельствует не только о необходимости исследования изменений климата на региональном масштабе, но и выработки некоторого подхода, который бы позволил количественно оценить такое сложное понятие, как "изменение климата".

Именно поэтому в последние годы появились работы (см., например, [3, 4]), в

которых вводится понятие "индекса изменения климата", обобщающего, по возможности, количественные показатели климата, такие как характеристики изменчивости температуры и осадков. В настоящей работе описывается один из таких подходов и рассчитывается индекс изменения климата для Европы. Целью же исследования является выявление пространственных особенностей распределения такого комплексного показателя в целом над Европой и Украиной, в частности.

#### Материалы и метод исследования

Бейтиг и др. [4] представили совокупный индекс изменения климата, в котором разная климатическая информация суммируется в одну величину – возможную меру изменения климата, и применили его для определения интенсивности будущего изменения климата. Этот индекс состоит из годовых и сезонных показателей температуры и осадков. В настоящей работе оригинальный подход, развитый в их работе, адаптируется для выявления происшедших изменений климата на основе среднемесячных данных о приземной температуре и месячных сумм осадков с января 1949 по декабрь 2006 гг. Область расчета ограничена 30° и 80°с.ш. и 20°з.д. и 60°в.д.; шаг сетки по широте составляет 1,875°, а по долготе – ~1,9°.

Так как в индекс изменения климата (*CCI*) входят два показателя, то его можно представить в виде полусуммы двух индексов: первый имеет отношение к изменчивости температуры (*TI*), а второй – осадков (*PI*)

$$CCI = \frac{TI + PI}{2}. \quad (1)$$

Далее, индексы *TI* и *PI* учитывают отдельно события, которые могут иметь место в рассматриваемом периоде после получения среднегодовых и среднесезонных температур (*TI1* и *TI2*, соответственно) и годовых и сезонных сумм осадков (*PI1* и *PI2*, соответственно)

$$TI = \frac{TI1 + TI2}{2}, \quad PI = \frac{PI1 + PI2}{2}. \quad (2)$$

Наконец, каждый из индексов *TI1*, *TI2*, *PI1* и *PI2* представляется в виде:

$$\begin{aligned} TI1 &= \frac{ICY + IHY}{2}, & TI2 &= \frac{IHW + ICW + IHS + ICS}{4}, \\ PI1 &= \frac{IWY + IDY}{2}, & PI2 &= \frac{IWW + IDW + IWS + IDS}{4}. \end{aligned} \quad (3)$$

Введенные в формулу (3) обозначения будут объяснены несколько ниже.

Как можно видеть из выражений (1)-(3), вес каждого из индикаторов в отдельный индекс и группы индексов в *CCI* равняется единице. Строго говоря, такой подход не является оптимальным и задается а priori. Однако определить, какой вклад в изменение климата вносит каждый из индикаторов, вряд ли представляется возможным в настоящее время.

Таким образом, расчет индекса изменения климата сводится к вычислению 12 индикаторов, введенных в формулу (3). Конечно, наиболее простым было бы привлечение в виде таких индикаторов, определяющих изменение климата, обычных трендов, рассчитанных для всего периода. Однако более целесообразным является использование неких аномальных событий, так как экстремальные изменения режима осадков и температуры могут иметь более сильное влияние на природные и социальные

системы [1]. Поэтому авторами метода были отобраны четыре группы индикаторов, которые вместе способны описать важные характеристики изменения климата: изменения среднегодовой температуры, изменения суммы годовых осадков, изменения в явлениях экстремальных температур и изменения в явлениях экстремальных осадков, включая засухи. [4]. Так как предполагается аномальность событий, необходимо рассчитывать индикаторы на основе сравнения с характеристиками базового периода. Для этого в настоящей работе данные разбиваются на две "эпохи" – 1949-1977 гг. и 1978-2006 гг. – по 29 лет каждая и первая из них используется в качестве базового периода для определения изменений климата во второй. Продолжительность этих двух периодов почти равна длине классического периода (30 лет) по определению Всемирной метеорологической организации [1]. Более того, известно [2], что приблизительно с конца 1940-х годов по конец 1970-х годов в Европе наблюдалось понижение температуры, сменившееся затем интенсивным потеплением. Поэтому выбор периодов выглядит вполне обоснованным.

Для количественного описания отдельных индикаторов предлагается использовать принцип "1 раз в 20 лет" [4], который заключается в следующем. Сначала для всего периода, используемого в настоящей работе (1949-2006 гг.), рассчитывались средние для каждого года, зим и лет значения температуры, а также годовые, зимние и летние суммы осадков для каждого года периода. Затем, на основе данных базового периода (1949-1977 гг.) для каждой точки сетки с помощью накопленных повторяемостей определялись 95-я и 5-я перцентили. При этом предполагалось, что данные о температуре распределены нормально, а для данных об осадках характерно гамма-распределение. Для каждого из указанных в этом параграфе параметров определялось количество случаев, когда их величина превышала 95-ю, и число случаев, когда их величина была меньше 5-й перцентили. Далее, аналогичное количество случаев рассчитывалось для периода 1978-2006 гг. и вычислялась величина превышения количества случаев во втором периоде над количеством случаев в первом. Другими словами, если в первом периоде наблюдался 1 случай среднегодовой температуры выше 95-й перцентили, а во втором – 5 случаев, то в качестве некоего индикатора изменения климата берется разность этих величин, т.е. 4. Ясно, что такой подход основан не на трендах, а на аномальных и экстремальных проявлениях изменения климата. В последующем такие события будем называть аномальными.

Наконец, описание использованных в формуле (3) отдельных индикаторов изменения климата сведено в табл. 1. Напомним, что индикаторы изменения климата рассчитываются для периода 1978-2006 гг. по отношению к базовому периоду 1949-1977 гг. как разница между количеством аномальных событий в эти периоды.

Таким образом, составные индикаторы  $PI$  и  $PII$ , описываемые формулой (2), являются "вкладом" в индекс изменения климата аномальных событий температуры и осадков и состоят из годовых ( $PII$  и  $PII$  соответственно) и сезонных ( $PI1$  и  $PI2$  соответственно) аномалий. В следующем разделе будут представлены только эти составные индикаторы, хотя, в принципе, существует возможность исследования всех отдельных индикаторов.

Отметим, что по сравнению с оригинальной работой Бейтига и др. [4], здесь используется дополнительно три индикатора:  $ICY$ ,  $ICW$  и  $ICS$ . Связано это с тем, что авторы методики рассчитывали индекс изменения климата для периода 2071-2100 гг. по отношению к базовому периоду 1961-1990 гг. на основе данных двух прогонов моделей глобального климата для сценариев A2 и B2 (по поводу характеристик сценариев, см. [1, 2]). Согласно этих сценариев, глобальная температура к 2100 г. вырастет на 2,5-3,8 °C по отношению к базовому периоду, тогда как для данных, используемых в настоящей статье, такое изменение температуры составляет чуть

больше 0,5 °С. Естественно, что при таком большом повышении температуры к 2100 г. увеличилась не только среднегодовая температура, но и среднесезонные, т.е. аномально холодные зима и лето практически не будут наблюдаться. В нашем же случае, как показали расчеты, кроме аномально теплых годов, зим и лет, наблюдались и аномально холодные. Однако принцип расчета индекса изменения климата в настоящей статье и работе Бейтига и др. [4] остается одинаковым.

Таблица 1 – Индикаторы, суммируемые в индекс изменения климата

Индикатор	Описание
<i>ICY</i>	Количество аномально холодных годов по отношению к базовому периоду
<i>IHY</i>	Количество аномально жарких годов по отношению к базовому периоду
<i>ICW</i>	Количество аномально холодных зим по отношению к базовому периоду
<i>IHW</i>	Количество аномально жарких зим по отношению к базовому периоду
<i>ICS</i>	Количество аномально холодных лет по отношению к базовому периоду
<i>IHS</i>	Количество аномально жарких лет по отношению к базовому периоду
<i>IDY</i>	Количество аномально сухих годов по отношению к базовому периоду
<i>IWY</i>	Количество аномально влажных годов по отношению к базовому периоду
<i>IDW</i>	Количество аномально сухих зим по отношению к базовому периоду
<i>IWW</i>	Количество аномально влажных зим по отношению к базовому периоду
<i>IDS</i>	Количество аномально сухих лет по отношению к базовому периоду
<i>IWS</i>	Количество аномально влажных лет по отношению к базовому периоду

### Анализ результатов

На рис. 1 представлены индикаторы изменения климата, рассчитанные по аномалиям, связанным с температурой. На фоне общего увеличения аномально теплых или холодных годов, существуют регионы, где количество таких аномалий было особенно велико: Арктика, Северная Европа, Западное Средиземноморье, Каспийское море и Средняя Азия. Для Украины таким регионом является Крымский полуостров, хотя остальная ее часть может рассматриваться как территория, на которой количество аномально теплых или холодных годов выросла незначительно. В целом, данные, представленные в левой верхней части рис. 1 достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными на основе анализа линейных трендов (см., например, [1]), так как известно, что наибольшее потепление в Европе наблюдалось над Арктикой, Скандинавией и Средиземным морем. Правая верхняя часть рис. 1 подтверждает этот вывод, хотя количество аномально теплых или холодных зим и лет выросло над большей частью территории Европы меньше, чем аномально теплых или холодных годов. Поэтому в большей степени составной индикатор *TI* определяется индикатором *III*. По сравнению с остальной Европой, Украина, за исключением Крымского полуострова, может рассматриваться как территория, на которой температурные аномалии проявлялись сравнительно редко, в среднем не более 2 раз за последние 29 лет. Интересным является и то, что более подверженными температурным аномалиям оказались регионы, расположенными ближе к Атлантическому и Северному Ледовитому океанам и Средиземному морю, хотя однозначно говорить о том, что здесь сказывается континентальность климата все-таки трудно, так как достаточно существенные изменения прослеживаются и в восточной части Средней Азии.

Как и следовало ожидать, изменения климата, проявляющиеся в аномалиях режима осадков, характеризуются большей "пятнистостью" (рис. 2), а характеристика распределения индикатора климата, связанного с аномалиями осадков, в достаточной степени отличается от предыдущего индикатора. Прежде всего, это связано с тем, что

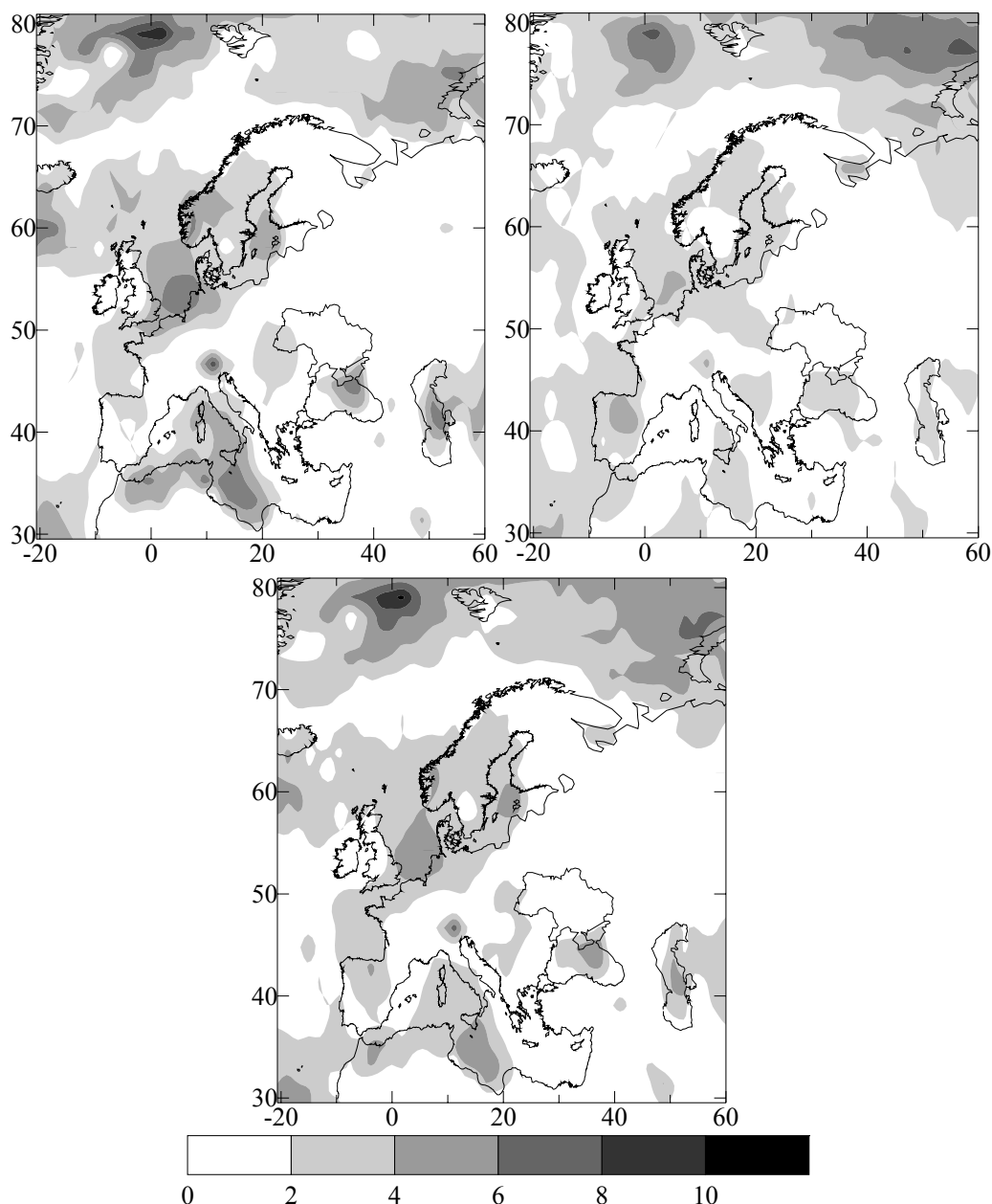


Рисунок 1 – Поле индикаторов  $TII$  (вверху слева),  $TI2$  (вверху справа) и  $TI$  (внизу) для периода 1978-2006 гг. по отношению к базовому периоду 1949-1977 гг.

Ось  $x$  – долгота, ось  $y$  – широта.

значительные аномалии в режиме осадков наблюдаются над Центральной Европой, Балканами и северо-востоком Турции. С другой стороны оба индикатора изменения климата над Северной Атлантикой и Арктикой распределены почти одинаково. Общим же для режима температуры и осадков является то, что в обоих случаях годовые аномалии превышают аномалии сезонные. Если же рассматривать отдельно территорию Украины, то можно говорить о большей подверженности изменениям климата, связанными с аномалиями в режиме осадков, западной и юго-западной ее частей, особенно с точки зрения годовых аномалий осадков, тогда как восточные области характеризуются небольшими значениями индексов  $PI1$ ,  $PI2$  и  $PI$ . В целом же можно говорить, что изменения климата над Украиной, сказавшиеся в аномалиях режима осадков, проявляются более значительно, чем изменения в температурном режиме. Поэтому одним из выводов проведенного анализа может быть заключение о

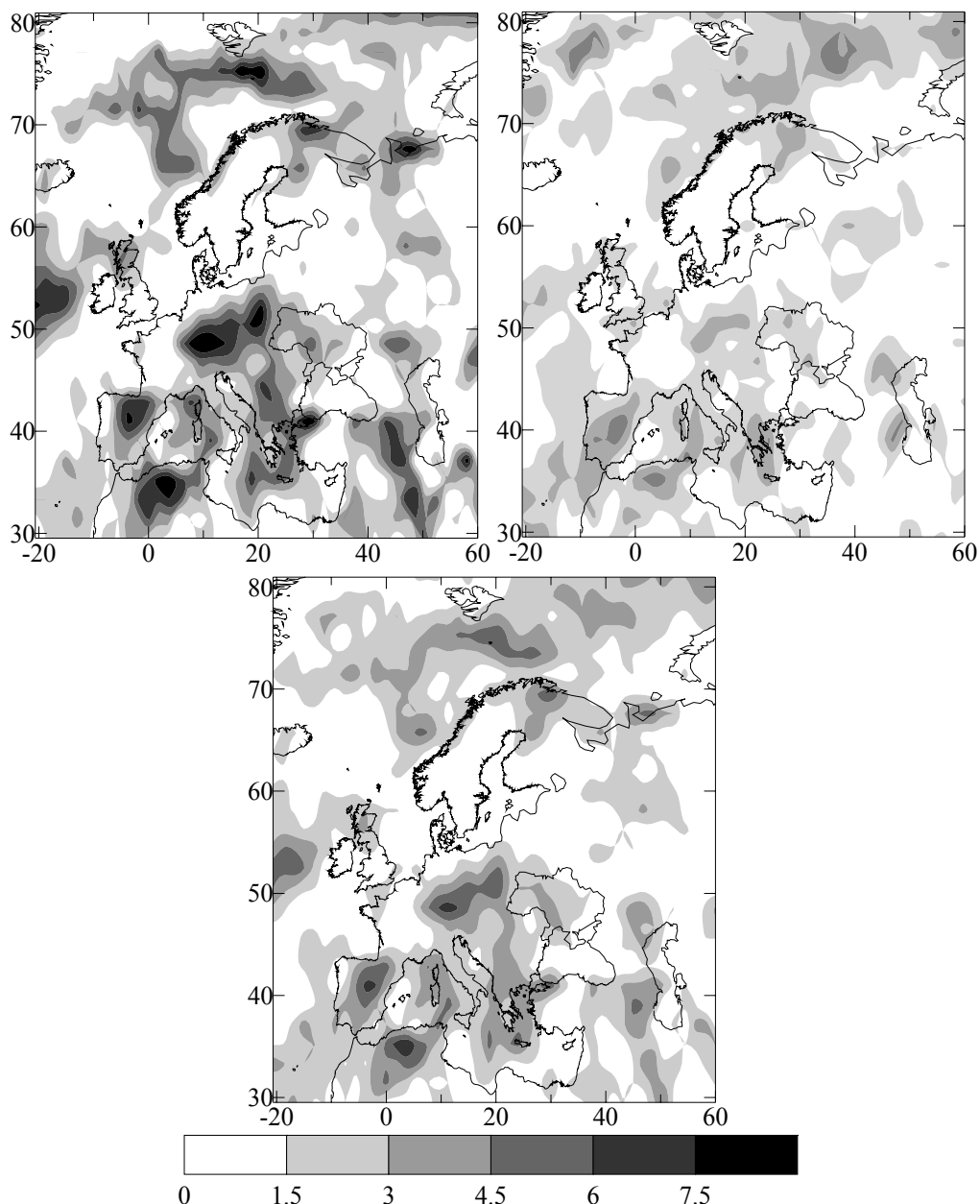


Рисунок 2 – Поле индикаторов  $PII$  (вверху слева),  $PI2$  (вверху справа) и  $PI$  (внизу) для периода 1978-2006 гг. по отношению к базовому периоду 1949-1977 гг.

Ось  $x$  – долгота, ось  $y$  – широта.

том, что при разделении территории Украины на отдельные территории для изучения изменения климата в них предпочтительнее использовать характеристики поля осадков, чем температуры.

Перед тем, как проанализировать величины  $CCI$ , разобьем их условно на 3 категории. Первую (значения от 0 до 2) будем называть слабыми изменениями климата, вторую (от 2 до 4) – умеренными, а третью (больше 4) – сильными. Тогда, анализ поля совокупного индекса изменения климата (рис. 3) показывает, что наиболее ярко эти изменения прослеживаются севернее  $70^\circ$  с.ш., над Центральной Европой, Северным морем, Пиренейским полуостровом, западной и центральной частями Средиземного моря. С другой стороны, территория России была подвержена слабым изменениям климата, так же как и территория Украины, за исключением западной ее части, где эти изменения можно считать умеренными.

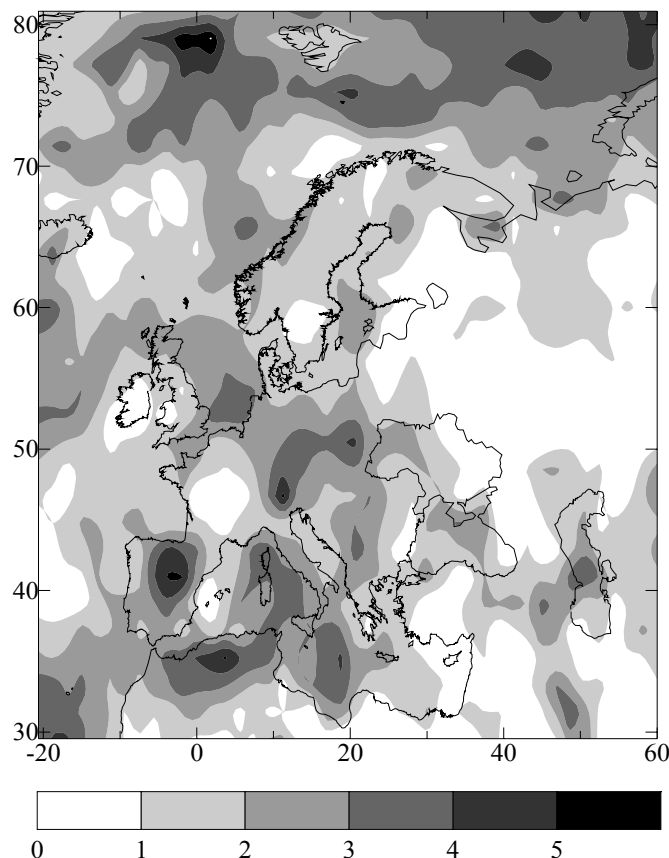


Рисунок 3 – Совокупный индекс изменения климата для периода 1978-2006 гг. по отношению к базовому периоду 1949-1977 гг. Ось  $x$  – долгота, ось  $y$  – широта.

Сравнение рис. 1-3 показывает, что очаги сильного изменения климата чаще обуславливаются аномалиями режима осадков, чем температуры, за исключением Арктики, где как один, так и другой индикатор, имеют однонаправленное влияние на величину индекса изменения климата. Более того, значительная пятнистость, характерная для поля этого индекса, говорит о том, что глобальный процесс, который мы именуем изменением климата, может проявляться в различных географических районах по-разному, причем выявить некую закономерность, используя климатические термины (горный климат, климат пустынь, морской климат, континентальный климат и т.д.), очень сложно.

### Выводы

В настоящей статье описывается метод расчета совокупного индекса изменения климата, определяющего то, насколько сильно изменился климат по отношению к базовому периоду. Этот индекс, по существу, является обычным средним от количества аномальных событий, имеющих место в режиме температуры и осадков, и основан на принципе "1 раз в 20 лет", т.е. учитывает только те события, которые происходят 1 раз в 20 лет и реже. Другими словами, индекс изменения климата в некоторых единицах показывает, насколько изменился климат, но не объясняет, почему это произошло. Достоинством описанного метода является то, что с его помощью можно выявить относительную интенсивность, с которой изменялся климат в различных регионах.

Анализ рассчитанных значений этого индекса показал, что наибольшие изменения климата в 1978-2006 гг. имели место в Арктике, Центральной Европе, западной и центральной частях Средиземного моря, на Пиренейском полуострове. На большей части Украины, при этом, изменения климата были слабыми, за исключением Западной Украины, где отмечались умеренные изменения климата. Более того, если

рассматривать территорию Украины с точки зрения аномальности среднегодовых или среднесезонных температур, то Украина является почти однородной территорией по этому индикатору изменения климата, которое, к тому же, является слабым. Поэтому можно сделать вывод, что при исследованиях изменений регионального климата над Украиной предпочтительнее использовать аномалии (или изменения) режима поля осадков, чем поля температуры.

Достоинством методики является также и то, что ее использование не ограничивается только аномалиями температуры и осадков и в расчет индекса изменения климата можно также включить дополнительные индикаторы, отображающие количество интенсивных циклонов и их траектории, увеличение уровня моря, изменчивость суточного хода температуры и т.д.

### Список литературы

1. *Изменение Климата, 2001 г. Обобщенный доклад* – Женева: МГЭИК, 2003. – 522 с.
2. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers* – Geneva: IPCC, 2007 – 18 p.
3. *Giorgi F. Climate change hot-spots // Geophys. Res. Lett., 2006. – V. 33. – L08707.*
4. *Baettig M.B., Wild M., Imboden D.M. A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century // Geophys. Res. Lett., 2007. – V. 34. – L01705.*

#### **Кількісний опис зміни клімату Європи у другій половині ХХ-го сторіччя. Хохлов В.М.**

*Описується методика розрахунку сукупного індексу зміни клімату, що ураховує аномальні події температури та опадів. Метод застосовується для території Європи. Показано, що найістотніші зміни клімату у 1978-2006 рр. мали місце у Центральній Європі, західній та центральній частинах Середземного моря та на Піренейському півострові.*

*Ключові слова:* Зміна клімату, аномалії, температура, опади.

#### **Quantitative description of European climate change during second half of XX century. Khokhlov V.N.**

*Methodology for calculation of aggregate climate change index which taking into account abnormal events in the temperature and precipitation is described. The method is used for Europe. It is shown that greatest climate change during 1978-2006 years occurred in the Central Europe, Western and Central Mediterranean, and Pyrenees.*

*Key words:* climate change, anomalies, temperature, precipitation