

Е.П. Школьный, Э.Н. Серга

Влияние процессов в системе океан – атмосфера в Северной Атлантике на межгодовую изменчивость климатических характеристик на территории Украины

Сделана попытка изучить особенности погодо- и климатообразующих процессов, развивающихся в результате энерго- и массообмена между океаном и атмосферой в Северной Атлантике, а также отклики климата Украины на основные климатообразующие факторы. Основной для этих исследований послужила статистическая модель в виде системы нелинейных регрессионных уравнений третьей степени с обратными связями. Получена система производящих функций, которые позволили найти оценки коэффициентов регрессии. В созданной модели для сжатия исходной информации о влияющих факторах в районе расположения кораблей погоды был применен факторный анализ, позволивший выявить тенденции в изменении характеристик, участвующих в энерго- и массообмене. Реакция климата в различных регионах Украины на процессы в Северной Атлантике определялась путем использования кластерного анализа, алгоритм которого разработан авторами. Проведен ряд экспериментов для различных ситуаций в районе Северной Атлантики, возможных вследствие глобального потепления климата. Исследована реакция климатических характеристик на территории Украины при подобных процессах. На основе данных о реальной ситуации в феврале 2006 г. проверена адекватность созданной модели. Показано, что модель удовлетворительно описывает отклики климатических характеристик в регионах Украины на изменения влияющих факторов в Северной Атлантике.

Введение

В конце второй половины XX в. исследования климата Земли приобрели особую остроту. Связано это в первую очередь с предполагаемым усилением парникового эффекта и соответственно повышением глобальной температуры воздуха. Свидетельством особого интереса к глобальному потеплению и его последствиям явилось принятие в июне 1992 г. Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Рио-де-Жанейро), которая была ратифицирована Украиной, взявшей на себя определенные обязательства, в том числе: повышать эффективность и интенсивность научных исследований по вопросам глобальных и региональных изменений климата, а также по вопросам оценки экологических и социально-экономических последствий глобального потепления.

Подтверждением повышенного интереса к проблемам изменения климата и их актуальности являются исследования последних десятилетий в рамках международных научных проектов, таких как «Разрезы», *TOGA*, *CLIVAR* и другие, которые были направлены на изучение низкочастотных взаимодействий важнейших с точки зрения формирования глобального и регионального климатов компонент климатической системы океан – атмосфера. Значительный вклад в решение этой проблемы внесли ученые Морского гидрофизического института НАН Украины [1 – 5].

Процессы, происходящие в климатической системе, вызывают как ее ес-

© Е.П. Школьный, Э.Н. Серга, 2009

тественную изменчивость, так и реакцию на возмущения типа повышения концентраций атмосферных парниковых газов. При этом происходящие в климатической системе изменения, в свою очередь, также будут обуславливать глобальное распределение парниковых газов. Например, Североатлантическое колебание (САК) определяет перенос антропогенных газов в Арктику [6]. Процессы обратной связи усиливают или ослабляют реакцию на первоначальное возмущение и, следовательно, имеют большое значение для точного моделирования эволюции климата [7].

Основным фактором обратной связи в системе климата Земли, объясняющим значительное потепление, прогнозируемое климатическими моделями в ответ на повышение концентрации двуокиси углерода, является повышение содержания водяного пара в атмосфере. Повышение температуры увеличивает способность атмосферы удерживать воду.

Самая большая неопределенность в перспективных оценках климата связана с облаками и их взаимодействием с радиацией. Облака могут отражать солнечную радиацию, поглощать и испускать излучение в диапазоне длинных волн. Соотношение между этими процессами зависит от высоты, толщины и радиационных свойств облачности. При этом влияние на климат оказывают и облака верхнего яруса [8]. Радиационные свойства и эволюция облаков зависят от распределения атмосферного водяного пара, водных капель, частичек льда, атмосферных аэрозолей. Тем не менее количественные характеристики в системе облачность – радиация в настоящее время известны недостаточно.

Изменения характеристик подстилающей поверхности также создают важные обратные связи, поскольку изменение климата антропогенного происхождения оказывает влияние на состояние земной поверхности (например, на увлажненность почвы, альбедо, шероховатость поверхности и растительный покров). При этом такие изменения могут воздействовать на глобальный климат несколькими путями, например через крупномасштабное обезлесивание во влажных тропиках [9], которое приводит к уменьшению испарения и повышению приземной температуры.

Таким образом, одним из основных аспектов, которые можно выявить, анализируя приведенные выше факты, является различие в отклике региональных климатов на изменения глобального климата и климатов в других географических районах. Последнее может быть объяснено не только региональными особенностями, но и различным влиянием обратных связей, существующих в климатической системе.

Формирование аномалий климата, изменчивости параметров атмосферы необходимо рассматривать с учетом состояния деятельного слоя океана, особенно его температуры [10]. Океаны управляют расположенной над ними атмосферой главным образом посредством переноса энергии в форме тепловой ИК-радиации, явного тепла и тепла фазовых превращений. Наибольший вклад в энергетику атмосферы вносит тепловая ИК-радиация, наименьший – перенос явного тепла путем турбулентной теплопроводности. Второе место в энергетическом балансе принадлежит скрытому теплу – за счет испарения. В свою очередь, атмосфера воздействует на океан путем обмена импульсом. Этот механизм является основным в формировании океанических течений.

Процессы взаимодействия в системе океан – атмосфера являются чрезвычайно сложными. При их изучении следует рассматривать целую систему влияющих факторов. Кроме указанных выше механизмов энергетического обмена, определяющихся температурой поверхности океана, вертикальными градиентами температуры в приземном слое воздуха и скоростью ветра, необходимо учитывать типы циркуляционных процессов в атмосфере и океане. Применительно к Северной Атлантике интегральной характеристикой циркуляции атмосферы является Североатлантическое колебание. Однако если рассматривать временные масштабы в 1 – 2 мес, то необходимо учитывать тот факт, что Азорский антициклон и Исландская депрессия мигрируют в значительной степени по долготе и широте, изменяясь по интенсивности. Это оказывает большое влияние на интенсивность цикло- и антициклогенеза, а также на траектории перемещения барических образований на Евразийский континент. Индекс САК, являющийся нормированной разностью давления между Понта Делгада и Рейкьявиком, не в полной мере отражает характер циркуляционных процессов на таком временном интервале климатической изменчивости.

Как показывают исследования [3], проявляется статистическая связь на определенных временных масштабах между крупномасштабными атмосферными осцилляциями: САК, Северотихоокеанским колебанием (СТК) (для района с координатами 30 – 65° с.ш., 160° в.д. – 140° з.д.), Южным колебанием (ЮК) (о. Таити – г. Дарвин), которое непосредственно связано с явлением Эль-Ниньо, а также с осцилляцией, хорошо проявляющейся в циркуляционных процессах атмосферы в западном секторе Южного океана.

Все перечисленные факторы в той или иной мере оказывают влияние на формирование глобального и региональных климатов, в том числе и климата Украины. Учесть степень влияния каждого из них в отдельности и в комплексе на региональные климатические характеристики можно, используя методы многомерного статистического анализа. В настоящей статье излагаются результаты попытки решения этой задачи для территории Украины посредством комплекса статистических моделей.

Методика исследований и исходный материал

В основу исследований положена статистическая модель. Она представляет собой систему регрессионных уравнений третьей степени с обратными связями. В данной работе такая система включает четыре уравнения для следующих откликов \hat{y}_i : среднемесячное количество общей облачности, месячное количество осадков, среднемесячная температура воздуха и среднемесячная массовая доля водяного пара. Прежде чем вести речь о физических особенностях структурирования модели, представляется необходимым кратко акцентировать внимание на математических аспектах.

Система уравнений регрессии представлена следующим уравнением:

$$\hat{y}_l = a_0^{(l)} + \sum_{i=1}^m a_i^{(l)} x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \leq j)}}^m a_{ij}^{(l)} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,s=1 \\ (i \leq j \leq s)}}^m a_{ijs}^{(l)} x_i x_j x_s + \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} y_v, \quad (l = \overline{1, k}). \quad (1)$$

В системе уравнений на влияющие факторы x_i налагаются условия центрированности и некоррелируемости. Кроме того, постулируется, что влияющие факторы подчиняются многомерному нормальному распределению.

Для оценки коэффициентов модели применен метод вероятностной аппроксимации. Он заключается в том, что параметры модели находятся при условии нулевого математического ожидания ошибки аппроксимации и минимума ее дисперсии [11].

Удовлетворение указанных условий, а также условий, наложенных на влияющие факторы, приводит к следующей системе производящих функций:

$$z_0^{(l)} = a_0^{(l)} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \leq j)}}^m a_{ij}^{(l)} M[x_i x_j] = 0, \quad (2)$$

$$z_p^{(l)} = \sum_{i=1}^m a_i^{(l)} M[x_i x_p] + \sum_{\substack{i,j,t=1 \\ (i \leq j \leq t)}}^m a_{ijt}^{(l)} M[x_i x_j x_t x_p] + \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} M[y_v x_p], \quad (p = \overline{1, m}), \quad (3)$$

$$z_{ps}^{(l)} = a_0^{(l)} M[x_p x_s] + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \leq j)}}^m a_{ij}^{(l)} M[x_p x_s x_i x_j] + \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} M[y_v x_p x_s], \quad (p \leq s = \overline{1, m}), \quad (4)$$

$$z_{psr}^{(l)} = \sum_{i=1}^m a_i^{(l)} M[x_i x_p x_s x_r] + \sum_{\substack{i,j,t=1 \\ (i \leq j \leq t)}}^m a_{ijt}^{(l)} M[x_i x_j x_t x_p x_s x_r] + \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} M[y_v x_p x_s x_r], \quad (5)$$

$$(p \leq s \leq r = \overline{1, m}),$$

$$r_\mu = \sum_{i=1}^m a_i^{(l)} M[y_\mu x_i] + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \leq j)}}^m a_{ij}^{(l)} M[y_\mu x_i x_j] + \sum_{\substack{i,j,t=1 \\ (i \leq j \leq t)}}^m a_{ijt}^{(l)} M[y_\mu x_i x_j x_t] + \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} M[y_v y_\mu], \quad (6)$$

$$(\mu = \overline{1, k}; \mu \neq l),$$

где M означает операцию математического ожидания. Система (2) – (6) позволяет получить выражения для коэффициентов регрессионной модели:

$$a_0^{(l)} = - \sum_{p=1}^m a_{pp}^{(l)}, \quad (l = \overline{1, k}), \quad (7)$$

$$a_{pp}^{(l)} = \frac{z_{pp}^{(l)}}{2} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k a_v^{(l)} \frac{z_{pp}^{(v)}}{2}, \quad (p = \overline{1, m}), \quad (8)$$

$$a_{ps}^{(l)} = z_{ps}^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} z_{ps}^{(v)}, \quad (p < s = \overline{1, m}), \quad (9)$$

$$a_p^{(l)} = z_p^{(l)} - 3a_{pp}^{(l)} - \sum_{j=1}^{p-1} a_{jjp}^{(l)} - \sum_{j=p+1}^m a_{pjj}^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} z_p^{(v)}, \quad (p = \overline{1, m}), \quad (10)$$

$$a_{ppp}^{(l)} = \frac{1}{6} [z_{ppp}^{(l)} - 3z_p^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} (z_{ppp}^{(v)} - 3z_p^{(v)})], \quad (p = \overline{1, m}), \quad (11)$$

$$a_{pss}^{(l)} = \frac{1}{2} [z_{pss}^{(l)} - z_p^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} (z_{pss}^{(v)} - z_p^{(v)})], \quad (p < s = \overline{1, m}), \quad (12)$$

$$a_{pps}^{(l)} = \frac{1}{2} [z_{pps}^{(l)} - z_s^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} (z_{pps}^{(v)} - z_s^{(v)})], \quad (p < s = \overline{1, m}), \quad (13)$$

$$a_{psr}^{(l)} = z_{psr}^{(l)} - \sum_{\substack{v=1 \\ (v \neq l)}}^k \alpha_v^{(l)} z_{psr}^{(v)}, \quad (p < s < r = \overline{1, m}). \quad (14)$$

В качестве информации о влияющих факторах отбирались данные наблюдений с девяти кораблей погоды (табл. 1), которые функционировали в Северной Атлантике с 1953 по 1974 г.

Т а б л и ц а 1

Координаты расположения кораблей погоды

Координаты	Номер корабля погоды								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ , ° з.д.	33	51	35	41	48	19	20	16	1 °в.д.
φ , °с.ш.	62	56	53	44	35	59	52	45	69

Из данных измерений выбирались среднемесячные значения температуры поверхности океана T_w , температуры воздуха T_a , скорости ветра u и раз-

ности температуры воздуха и воды ΔT_{a-w} [12]. Ряды этих величин были удлинены путем привлечения соответствующих данных реанализа за 2002 г. [13, 14] для точек № 1 – 9, в которых располагались корабли соответственно № 1 – 9. Обоснованность удлинения этих рядов подтверждена путем проверки статистической гипотезы об их однородности с помощью критерия Вилкоксона (непараметрического критерия однородности двух выборок) [15].

Температура воздуха и поверхностных вод, скорость ветра в разных частях акватории Северной Атлантики формируются под влиянием циркуляционных процессов в атмосфере и океане. Изменчивость этих процессов, температура поверхностных вод в большой мере зависят от интенсивности и месторасположения основных центров действия атмосферы – Азорского максимума и Исландского минимума. Как указывалось выше, эти центры действия постоянно мигрируют, изменяется и их интенсивность. Это приводит к изменению бароклинности, а следовательно, интенсивности циклонической деятельности и траекторий перемещения циклонов. В определенной мере эти процессы отражает САК, которому в последние годы посвящается ряд исследований [16 – 18].

В ряде работ [3, 16, 19 – 21] установлено, что процессы, которые развиваются в Северной Атлантике, связаны с явлением ЭНЮК (Эль-Ниньо – Южное колебание). Известны правдоподобные гипотезы об этих взаимовлияниях [21]. Поэтому мы включили в число влияющих факторов индекс ЭНЮК, равно как и индекс САК. Однако в связи с миграцией центров действия в Северной Атлантике этот показатель не всегда отражает степень бароклинности в атмосфере. Поэтому мы взяли в качестве влияющих факторов еще и географические координаты центров действия атмосферы и разность давления Δp между ними. Изменения координат центров действия значительны. Например, центр Азорского максимума в рассматриваемый период перемещался в декабре от 75° до 4° з.д. и от 12° до 44° с.ш., а Исландского минимума – от 52° з.д. до 0° и от 47° до 68° с.ш. Разность давления Δp между центрами изменялась в пределах от 15 до 75 гПа. Совершенно ясно, что атмосферные процессы в Северной Атлантике связаны с атмосферными процессами над северной частью Тихого океана, а также над средними и высокими широтами Северо-Американского континента. Интенсивность этих процессов в определенной мере характеризует СТК. Индекс этого колебания также был включен в число влияющих факторов.

В работах [22, 23] показано, что влияние процессов в Северной Атлантике на погодо- и климатоформирующие процессы в Восточной Европе проявляется через 1 – 3 мес. Поэтому статистические ряды влияющих факторов формировались за декабрь, а характеристик климата Украины – за февраль.

Описание результатов и их анализ

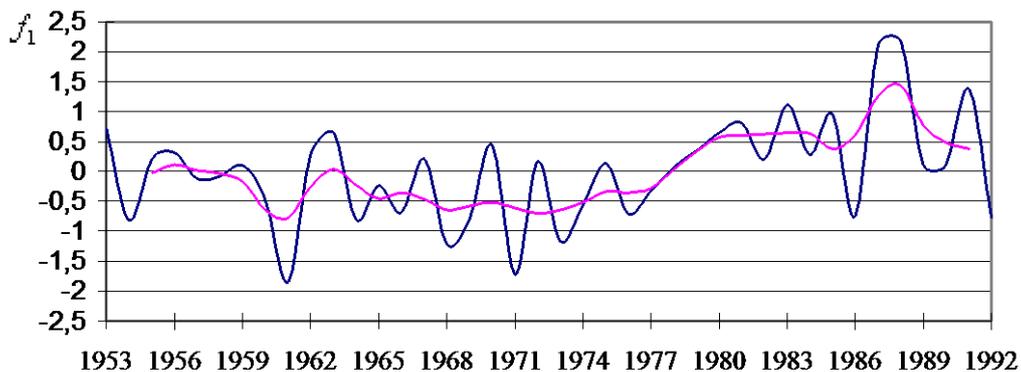
Для сжатия информации о влияющих факторах в районе расположения каждого корабля погоды множество рассматриваемых характеристик было подвергнуто факторному анализу [24]. В результате оказалось, что измеряемые параметры ΔT_{a-w} , T_a , T_w и u (кроме данных корабля № 4) определяются двумя факторами f_1 и f_2 . В районе расположения корабля № 4 указанные характеристики формируются под влиянием только одного фактора f_1 . В табл. 2 приводятся веса факторов для каждой из переменных.

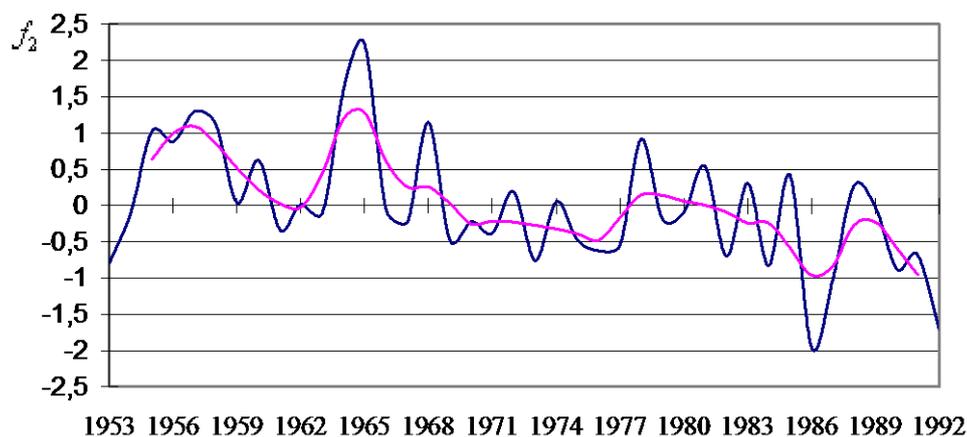
Веса общих факторов в физических переменных (декабрь)

Физическая переменная	Фактор	Номер корабля погоды								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔT_{a-w}	f_1	0,9	1,0	0,9	0,8	0,2	0,8	1,0	-0,1	1
	f_2	-0,3	-0,0	-0,2	-	-0,9	-0,5	-0,0	-1,0	-0,1
T_a	f_1	0,9	0,9	0,8	1	0,9	1	0,8	0,6	1
	f_2	0,4	0,5	0,5	-	-0,4	0,0	0,6	-0,8	0,1
T_w	f_1	0,2	0,1	0,1	0,7	0,9	0,0	0,1	0,9	0,5
	f_2	0,9	1,0	1,0	-	0,2	0,9	0,9	-0,2	0,6
u	f_1	0,2	-0,8	-0,7	-0,8	0,1	0,2	-0,1	-0,7	-0,2
	f_2	-0,7	-0,0	-0,3	-	0,7	-0,5	-0,7	-0,0	0,9

Видно, что бóльшие факторные нагрузки на ΔT_{a-w} и T_a приходятся на f_1 , а нагрузки на T_w – на фактор f_2 . Нагрузки на скорость ветра u факторов f_1 и f_2 зависят от географического положения кораблей погоды в Северной Атлантике. Массивы значений всех факторов формировались за декабрь.

Большой интерес представляют временные ряды влияющих факторов. Например, на рис. 1, 2 представлены временные ряды факторов f_1 и f_2 в точке расположения корабля погоды № 6 (на стрезне Северо-Атлантического течения между Исландией и Ирландией).

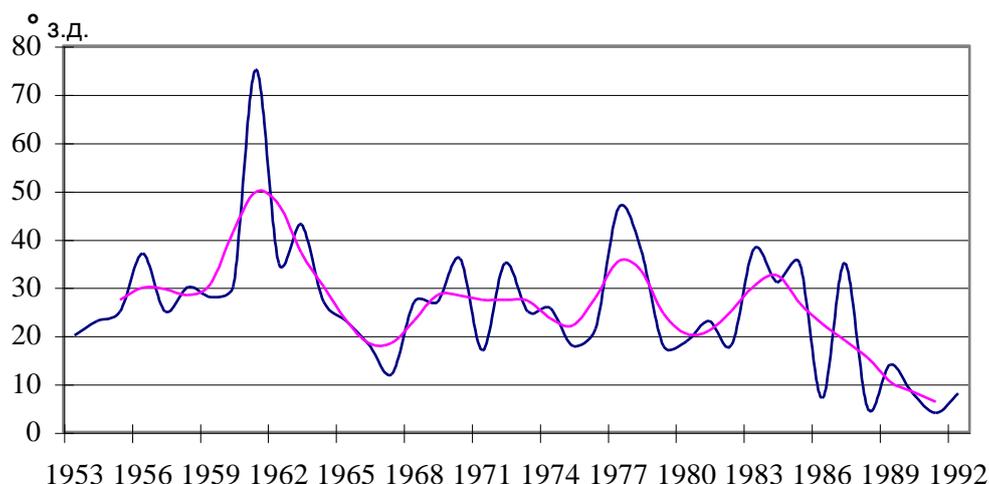
Р и с. 1. Исходный и сглаженный временные ряды фактора f_1 в точке № 6



Р и с. 2. Исходный и сглаженный временные ряды фактора f_2 в точке № 6

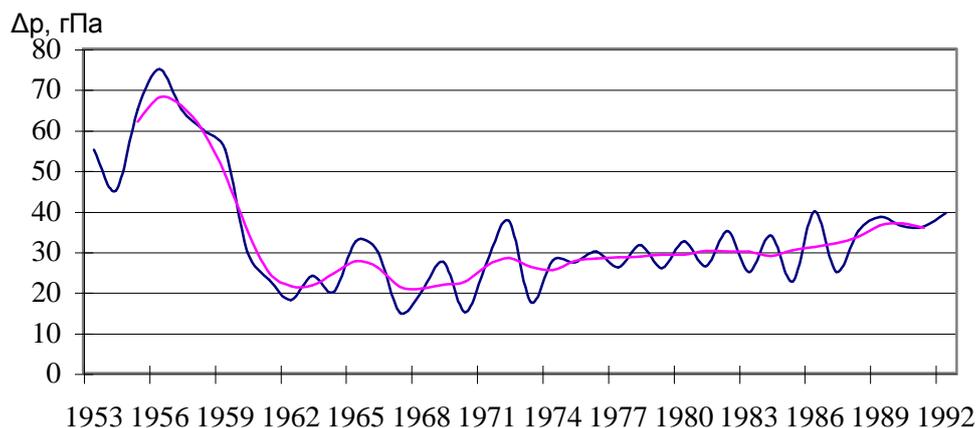
Фактор f_1 в точке № 6 оказывает большую положительную нагрузку на температуру воздуха T_a и разность температур воздуха и воды ΔT_{a-w} , а фактор f_2 – на температуру воды T_w . Как следует из рис. 1, 2 и табл. 2, начиная с 70-х годов XX в. наблюдаются тенденции роста T_a и ΔT_{a-w} и уменьшения температуры поверхности океана T_w .

На рис. 3 показан временной ряд долготы центра Азорского максимума. Видно, что в последние десятилетия прошлого века он имеет тенденцию смещаться к востоку.



Р и с. 3. Исходный и сглаженный временные ряды долготы Азорского максимума

Рассматривая временной ход разности давления между основными центрами действия атмосферы (рис. 4), нетрудно видеть, что имеет место тенденция усиления бароклинности в акватории Северной Атлантики.



Р и с. 4. Исходный и сглаженный временные ряды разности давления Δp между Азорским максимумом и Исландским минимумом

В качестве откликов в системе уравнений (1) рассматривались поля климатических характеристик за февраль, полученные на 33 метеорологических станциях, равномерно покрывающих территорию Украины. К ним относятся среднемесячный балл общей облачности, среднемесячное значение температуры воздуха и массовой доли водяного пара и месячное количество осадков. Сдвиг по времени в 2 мес, как указано выше, объясняется тем, что процессы в Северной Атлантике и отклики климатических характеристик на Украине наблюдаются именно с таким временным сдвигом.

С помощью разработанного нами алгоритма кластерного анализа [25] на основе указанных данных было проведено выделение районов со сходными характеристиками климата. Таких районов оказалось три. Они представлены на рис. 5.



Р и с. 5. Климатические районы на территории Украины, выделенные с помощью кластерного анализа (февраль)

Для каждого из районов были установлены центры кластеров (или эталоны). Эталонные ряды среднемесячных значений общей облачности, массовой доли водяного пара, температуры воздуха и месячного количества осадков использовались при оценке коэффициентов уравнений регрессии.

Одним из основных условий метода вероятностной аппроксимации, на основе которого получены уравнения для параметров модели, является условие ортогональности влияющих факторов. Чтобы удовлетворить этому условию, перед вычислением параметров модели была осуществлена ортогонализация факторов с помощью известного алгоритма Грамма – Шмидта. Использование ортогональных влияющих факторов привело к тому, что дисперсия каждого l -го отклика равна сумме дисперсий, обусловленных действием каждого отдельного влияющего фактора, т.е.

$$D_x[\hat{y}_l] = \sum_{p=1}^m \chi_p^2(\hat{y}_l), \quad (15)$$

где $\chi_p^2(\hat{y}_l)$ – вклад в суммарную дисперсию p -й компоненты. Это дает возможность, проанализировав эти вклады путем дисперсионного анализа, исключить те факторы, которые не дают значимого вклада (вероятность при проверке соответствующей гипотезы принималась равной 0,8). Таким же методом проверялись гипотезы о значимости в уравнениях членов, имеющих вторые и третьи степени.

После этого была осуществлена проверка адекватности модели путем расчета коэффициентов корреляции между фактическими и модельными значениями откликов. Они содержатся в табл. 3. Видно, что коэффициенты корреляции велики и статистически значимы.

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты множественной корреляции между фактическими и модельными значениями характеристик климата (февраль)

Характеристика климата	Кластер		
	1	2	3
Облачность	0,74	0,82	0,55
Осадки	0,74	0,67	0,66
Температура	0,60	0,70	0,52
Массовая доля водяного пара	0,76	0,74	0,80

Как следует из табл. 3, адекватность модели является вполне удовлетворительной. Это дало возможность провести ряд численных экспериментов для наиболее важных характеристик климата: аномалий осадков ΔR , температуры воздуха ΔT_a и массовой доли водяного пара Δe .

Приведем некоторые результаты численных экспериментов.

Эксперимент 1. Прежде всего рассматривались ситуации с заданным пространственным распределением ΔT_{a-w} . Эта характеристика, как известно, в большой мере оказывает влияние на обмен скрытым и явным теплом между атмосферой и океаном. Были рассмотрены две ситуации.

I. Задавались максимальные по модулю значения ΔT_{a-w} в точках расположения кораблей № 3, 6 – 9, т.е. в зоне Северо-Атлантического течения, и минимальные по модулю значения ΔT_{a-w} в точках № 1, 2, 4, 5 – в зоне холодных противотечений (максимальные и минимальные значения были взяты из выборки).

II. Задавались минимальные по модулю значение ΔT_{a-w} в точках № 3, 6 – 9 и максимальные по модулю – в точках № 1, 2, 4, 5.

Следует заметить, что в ситуациях I и II температура поверхности океана различалась незначительно (на 0,2 – 0,8°C). Существенные различия значений ΔT_{a-w} , которые задавались в экспериментах, обуславливались изменениями температуры воздуха в этих районах, определяющимися характером атмосферных процессов.

Эти ситуации рассматривались при различных состояниях САК (табл. 4). При этом принимались средние значения индексов ЭНЮК и СТК.

Т а б л и ц а 4

Варианты состояния САК

Вариант состояния САК	Характеристика состояния САК				
	Δp , гПа	Азорский максимум		Исландский минимум	
		λ , ° з.д.	φ , ° с.ш.	λ , ° д.	φ , ° с.ш.
1	15	4	26	0	68
2	75	4	43	0	68
3	15	75	26	0	68
4	75	4	26	0	47

Отклики климатических характеристик на ситуации I и II представлены в табл. 5.

Из таблицы следует, что, во-первых, отклики климатических характеристик в разных регионах Украины имеют разную структуру. Во-вторых, она в большой мере зависит от ситуаций, которые определяют распределение в Северной Атлантике рассматриваемых температурных характеристик. В-третьих, аномалии массовой доли водяного пара в численных экспериментах мало чувствительны к изменениям факторов, поэтому в дальнейшем будем обращать внимание на основные климатические характеристики: среднемесячную температуру воздуха и месячное количество осадков.

Отклики климатических характеристик

Вариант состояния САК	Ситуация I			Ситуация II		
	ΔR , мм	ΔT_a , °C	Δe , г/кг ³	ΔR , мм	ΔT_a , °C	Δe , г/кг ³
Северо-Восточная Украина (кластер 1)						
1	-3,37	-0,10	-0,06	2,28	-0,18	-0,02
2	-3,07	0,26	0,04	2,56	0,17	0,07
3	-3,02	-0,42	-0,14	2,47	-0,62	-0,14
4	-2,75	0,34	0,06	2,81	0,24	0,09
Западная Украина (кластер 2)						
1	-5,92	-1,99	-0,54	9,49	1,46	0,42
2	-6,16	-1,93	-0,52	9,27	1,52	0,43
3	-6,27	-1,90	-0,52	9,25	1,52	0,43
4	-6,44	-1,86	-0,50	9,05	1,57	0,45
Южная Украина (кластер 3)						
1	0,10	-0,16	-0,05	1,79	0,38	0,13
2	0,03	-0,03	-0,01	1,73	0,49	0,17
3	0,03	-0,03	-0,01	1,72	0,50	0,18
4	-0,05	0,11	0,03	1,66	0,60	0,21

Ситуация I характеризуется частыми вторжениями на поверхность океана, где располагается Северо-Атлантическое течение, холодного воздуха, а в область расположения холодного Восточно-Гренландского и Лабрадорского течений – относительно теплого воздуха. Такой процесс происходит при активной циклонической деятельности в северных районах Атлантики с преобладанием циклонов, направленных на север Европы.

Вторжение холодного воздуха в тылу этих циклонов обуславливает отрицательные аномалии месячного количества осадков и среднемесячной температуры воздуха в западной части Украины (кластер 2) и отрицательные аномалии осадков в Северо-Восточной Украине (кластер 1). Южная часть Украины (кластер 3) практически не реагирует на эти процессы. Это можно объяснить тем, что климатические характеристики в этом регионе в феврале определяются главным образом средиземноморскими процессами.

Совсем иными являются климатические отклики на процессы в Северной Атлантике, которые имеют место при ситуации II. На центральную и восточную части акватории, т.е. на районы расположения Северо-Атлантического течения, выносятся теплый воздух. Такая ситуация может сформироваться, когда над восточной частью Северной Атлантики и Западной Европой располагается гребень высокого давления. Тогда над Центральной Европой разви-

вается глубокая ложбина, что обуславливает заток холодного воздуха в районы Средиземного моря. Такие условия благоприятны для образования циклонов, которые перемещаются на северо-восток, т.е. на районы Украины. Это приводит к значительным положительным аномалиям осадков в западной ее части (кластер 2). Что касается южной части (кластер 3), то незначительные положительные аномалии температуры и несколько большие аномалии осадков наблюдаются, когда центр Азорского максимума располагается в восточной части Северной Атлантики.

Эксперимент 2. Этот эксперимент состоял в следующем. Как известно, в результате глобального потепления происходит таяние шельфовых льдов и вынос холодными противотечениями все бóльших масс опресненной воды. Предполагается, что это приведет к тому, что в точках № 1, 2, 6, 9 температура поверхностной воды будет составлять 0°C, на 3°C понизится температура воды в точках № 3, 4, 7, 8 по сравнению со средней месячной. При этом ΔT_{a-w} предполагается максимальной, Исландская депрессия находится в крайне западном положении (координаты центра $\lambda = 51^\circ$ з.д., $\varphi = 59^\circ$ с.ш.), а Азорский антициклон располагается в восточной части Атлантики (центр $\lambda = 4^\circ$ з.д., $\varphi = 35^\circ$ с.ш.). Максимальные значения бароклинности $\Delta p = 75$ гПа, при средних значениях индексов СТК и ЭНЮК.

Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Отклики в аномалиях характеристик климата на рассмотренные процессы в Северной Атлантике (гипотеза похолодания глобального климата)

Аномалии	Северо-Восточная Украина	Западная Украина	Южная Украина
ΔR , мм	-2,2	-12,3	-4,1
ΔT_a , °C	-0,4	-2,4	-2,1

Видно, что при такой ситуации Украину ждет похолодание и уменьшение количества осадков. Наиболее значительным влияние оказывается в западной части Украины.

Эксперимент 3. Последний эксперимент проведен на основе реальных данных для февраля 2006 г.

Для этой цели были приняты значения влияющих факторов для декабря 2005 г., приведенные в табл. 7.

Параметры циркуляционных процессов (декабрь 2005 г.)

Значение	Δp , гПа	Азорский максимум		Исландский минимум		$I_{ЭНЮК}$	$I_{САК}$	$I_{СТК}$
		λ , ° з.д.	φ , ° с.ш.	λ , ° з.д.	φ , ° с.ш.			
Среднее	33,8	25,7	34,7	26,6	59,0	-0,23	-0,03	-0,08
Факти- ческое	20,7	20,0	42,5	30,0	62,5	-0,30	-0,44	1,38

Полученные в результате расчетов аномалии месячных сумм осадков и среднемесячной температуры представлены в табл. 8.

Отклики характеристик климата (февраль 2006 г.)

Аномалии	Северо- Восточная Украина	Западная Украина	Южная Украина
ΔR , мм	1,9	5,7	3,3
ΔT_a , °C	-0,9	-0,6	-0,4

Видно, что модель дает положительные аномалии осадков и отрицательные аномалии температуры, что и было на самом деле.

В заключение следует заметить, что модельные расчеты по всем массивам факторов показали, что фактические аномалии откликов в большинстве случаев отличаются от модельных по абсолютной величине, но, как правило, совпадают по знакам.

Таким образом, модельные значения следует рассматривать как тенденции, а не как прогностические величины.

Выводы

Предложенная статистическая модель взаимосвязи процессов энерго- и массообмена между океаном и атмосферой в акватории Северной Атлантики адекватно отражает влияние этих процессов на формирование особенностей климата регионов Украины.

Численные эксперименты с моделью при различных температурных характеристиках поверхности океана и воздуха и различных положениях центров Азорского максимума и Исландской депрессии позволяют получить от-

клики климатических характеристик на территории Украины, которые находят убедительные физические обоснования.

Эксперимент, определяющий условия значительного таяния арктических шельфовых льдов и выноса больших масс опресненных талых вод в акваторию Северной Атлантики, показывает, что на территории Украины региональный климат будет характеризоваться отрицательными аномалиями температуры и осадков, т.е. значительным похолоданием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воскресенская Е.Н., Зеленько А.А., Полонский А.Б.* Эль-Ниньо 1991 – 1992 гг. и его проявление в Тропической Атлантике // *Морской гидрофизический журнал.* – 1992. – №6. – С.28 – 36.
2. *Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б.* Низкочастотная изменчивость гидрометеорологических полей и потоков тепла в Северной Атлантике // Там же. – 2004. – №4. – С.19 – 38.
3. *Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б.* Северо-Атлантические колебания и их связь с Эль-Ниньо – Южными осцилляциями // Там же. – 1992. – №4. – С.23 – 30.
4. *Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б.* Тренды и межгодовая изменчивость параметров низкочастотных взаимодействий атмосферы и океана в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология.* – 1993. – №11. – С.73 – 80.
5. *Полонский А.Б.* Роль океана в современных изменениях климата // *Морской гидрофизический журнал.* – 2001. – №6. – С.32 – 58.
6. *Eckhardt S., Stohl A., Beirle S. et al.* The North Atlantic Oscillation control of air pollution transport to the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* – 2003. – 3. – P. 1769 – 1778.
7. *Boer G.J., Yu B.* Climate sensitivity and response // *Clim. Dyn.* – 2003. – 20. – P. 415 – 429.
8. *Chou C., Neelin J.D.* Cirrus detrainment-temperature feedback // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – 26. – P.1295 – 1298.
9. *Burke E.J., Shuttleworth W.J., Yang Z.-L. et al.* The impact of the parameterization of heterogeneous vegetation on the modeled large-scale circulation in CCM3-BATS // *Ibid.* – 2000. – 27. – P. 397 – 400.
10. *Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б.* Межгодовая и десятилетняя изменчивость теплозапаса верхнего 200-метрового слоя в Тропической Атлантике в 1950 – 1992 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2001. – 37, №2. – С.497 – 505.
11. *Школьный Е.П.* Многофакторная регрессионная модель физико-статистического метода прогноза погоды // *Тр. УкрНИГМИ.* – 1976. – Вып. 134. – С.3 – 24.
12. *Средние* месячные, декадные и пентадные температуры воды, воздуха, разности температур «воздух – вода» и скорости ветра в отдельных районах Северной Атлантики (1953 – 1974 гг.). Ч. 1. – Обнинск, 1976.
13. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 1996. – 77, № 3. – P. 437 – 471.
14. *Kistler R., Kalnay E., Collins W. et al.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation // *Ibid.* – 2002. – 82, № 2. – P. 247 – 268.
15. *Математическая энциклопедия.* В 4 т. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – Т.1: Вилкоксона критерий. – С. 694.
16. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н., Ворли С.* Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // *Морской гидрофизический журнал.* – 2004. – №2. – С.42 – 59.
17. *Visbeck M., Harrell J.W., Kushnir Y.* The first international Conference on the North Atlantic Oscillation (NAO) // *Exchanges.* – 2001. – 6, № 1. – P. 24 – 25.

18. *Czaja A., Marshall J.* Role of Ocean Dynamics and Atmosphere – Ocean coupling in the observed North Atlantic Decadal Variability // *Ibid.* – 2001. – 6, № 1. – P. 15 – 17.
19. *Кузин В.И., Мусеев В.М.* Моделирование реакции океана на атмосферные воздействия в период Эль-Ниньо // Тр. междунар. конф., посвященной 75-летию академика Г.И. Марчука и 20-летию Института вычислительной математики. – М., 2000. – Т. II. – С.113 – 120.
20. *Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н., Баширин Д.В.* О влиянии океана на изменчивость температуры Европейского и Средиземноморского регионов // *Морской гидрофизический журнал.* – 2000. – № 5. – С.30 – 45.
21. *Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н., Баширин Д.В. и др.* Глобальные и региональные проявления Эль-Ниньо в полях приземного давления и температуры в весенний период // Там же. – 2003. – № 3. – С.50 – 62.
22. *Дианский Н.А., Глазунов А.В.* Моделирование взаимодействия атмосферы и верхнего слоя океана в средних широтах // Тр. междунар. конф., посвященной 75-летию академика Г.И. Марчука и 20-летию Института вычислительной математики. – М., 2000. – Т. II. – С.69 – 88.
23. *Андрианова О.Р.* О связи тепловых аномалий в Северной Атлантике и на европейской территории СССР // *Метеорология и гидрология.* – 1986. – №7. – С. 114 – 116.
24. *Лоули Д., Максвелл А.* Факторный анализ как статистический метод. – М.: Мир, 1967. – 211 с.
25. *Серга Э.Н.* Универсальный адаптивный итерационный метод кластерного анализа // *Міжвідомчий науковий зб. України: Метеорологія, кліматологія та гідрологія.* – 2003. – Вип.47. – С.83 – 89.

Одесский государственный университет

Материал поступил
в редакцию 16.01.08
После доработки 26.05.08

ABSTRACT An attempt is made to study the features of weather- and climate-forming processes developing as a result of energy- and mass-exchange between the ocean and the atmosphere in the North Atlantic, and also the response of climate in Ukraine to main climate-forming factors. The statistical model in a form of nonlinear regression equations of the third order with feedbacks constitutes a basis for the research. The system of cause-of-value functions permitting to find the estimates of regression coefficients is obtained. To reduce the initial information on the affecting factors in the region of weather ships location, the factor analysis permitting to reveal the tendencies in variation of the characteristics participating in the energy- and mass-exchange, is applied in the developed model. Climate response in various regions of Ukraine to the processes in the North Atlantic is defined by the cluster analysis whose algorithm is developed by the authors. A series of experiments simulating various possible situations in the North Atlantic resulting from global climate warming is carried out. The response of climatic characteristics on the territory of Ukraine at such processes is studied. Adequacy of the developed model is tested based on the data of the situation in February, 2006. It is shown that the model satisfactorily describes the responses of climatic characteristics in the regions of Ukraine to the variations of the affecting factors in the North Atlantic.