

УДК 911.2

А. В. ХОЛОПЦЕВ, д-р геогр. наук, проф.,
Севастопольский морской институт,
г. Севастополь, улица Рыбаков, дом 7-А.
kholoptsev@mail.ru

А. Д. КЛЮЕВА
Черноморский филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7.
alkliuieva@gmail.com

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ОСО С УЧЕТОМ ВАРИАЦИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ЗНАЧИМЫХ РАЙОНОВ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА НА ПРИМЕРЕ ПОЛЬШИ

Учет изменений среднемесячных поверхностных температур районов Атлантического океана, которые наиболее значимо влияют на вариации распределения среднемесячных значений общего содержания озона над Польшей, позволяет осуществлять эффективное моделирование этих вариаций. Идентифицированные множественно-регрессионные модели этого процесса обладают устойчивостью к временным сдвигам как функции, так и аргументов, как минимум составляющим 2 года.

Ключевые слова: изменчивость, распределение, общее содержание озона, Польша, поверхностная океан, температура, моделирование, прогнозирование, статистическая связь, взаимодействие, тропосфера, стратосфера

Холопцев О. В., Ключева А. Д. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН РОЗПОДІЛУ В АТМОСФЕРІ СЕРЕДНЬОМІСЯЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ З УРАХУВАННЯМ ВАРІАЦІЙ ПОВЕРХНЕВИХ ТЕМПЕРАТУР ЗНАЧУЩИХ РАЙОНІВ АТ- ЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ НА ПРИКЛАДІ ПОЛЬЩІ

Облік змін середньомісячних поверхневих температур районів Атлантичного океану, які найбільш значимо впливають на варіації розподілу середньомісячних значень загального вмісту озону над Польщею, дозволяє здійснювати ефективне моделювання цих варіацій. Ідентифіковані множинно-регресійні моделі цього процесу володіють стійкістю до тимчасових зрушень як функції, так і аргументів, як мінімум складовим 2 роки.

Ключові слова: змінність, розподіл, загальний вміст озону, Польша, поверхнева температура, океан, моделювання, прогнозування, статистичний зв'язок, взаємодія, тропосфера, стратосфера

© Холопцев А. В., Ключева А. Д., 2014

Khlopcev O. V., Kliuieva A. D. EFFICIENCY EVALUATION OF MODELING CHANGES IN THE ATMOSPHERE OF MONTHLY TO DISTRIBUTIONS BASED ON THE VARIATION OF SURFACE TEMPERATURES IN THE SIGNICANT AREAS OF THE ATLANTIC OCEAN EXEMPLIFIED BY POLAND

Accounting changes of mean monthly temperatures at the surface areas of the Atlantic ocean, which most significantly affect the variation of the distribution of monthly averages of total ozone content over Poland, provides efficient modeling of these variations. Identified multiple regression model of this process are resistant to temporary changes as functions and arguments, at least 2 years.

Key words: variability, distribution, total ozone content, Poland, surface temperature, ocean, modeling, forecasting, statistical communication, interaction, troposphere, stratosphere

Введение

Озоновый слой в атмосфере Земли, благодаря своей способности интенсивно поглощать ультрафиолетовую радиацию Солнца, оказывает существенное влияние на развитие всех живых организмов на планете. Доказано, что изменчивость распределения общего содержания озона (далее ОСО) влияет на динамику появления у населения онкологических заболеваний. Поэтому совершенствование методик мониторинга изменчивости ОСО – актуальная проблема физической географии и экологии.

Во многих регионах мира мониторинг изменчивости ОСО осуществляется на озонметрических станциях, оснащенных специальными приборами, наиболее точным из которых является спектрофотометр Добсона. Абсолютная погрешность этого прибора составляет 7,5 единиц Добсона (далее е.Д.).

Данная методика может быть применена лишь в пунктах, где имеются озонметрические станции. Следует отметить, что во многих регионах мира такие станции отсутствуют, в то время как информация о состоянии озонового слоя над ними требуется для планирования мероприятий по защите их населения и развитию сельского хозяйства.

Информацию о состоянии озонового слоя в период после 1979 года можно получить на интернетсайте Всемирного центра мониторинга ультрафиолетовой радиации и озона (Торонто). Для ее получения применяются спектрофотометры TOMS и OMI, функционирующие на борту специализированных искусственных спутников Земли. Сбор усредненных среднесуточных и среднемесячных значений ОСО осуществляется над каждым районом планеты, расположенным вне области полярной ночи. Получаемые данные характеризуются пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и разрешением по уровню 25 е.Д.[1].

Обработанная информация поступает в Интернет с запаздыванием на несколько месяцев, что делает ее неактуальной и практически бесполезной для задач защиты населения и экономики от негативных последствий изменчивости озоносферы.

Вследствие несовершенства существующих методик мониторинга изменчивости ОСО, разработка альтернативных технологий представляет наибольший интерес для ряда стран, где озонметрические станции отсутствуют. К ним относится и Польша, экономически развитое государство, уделяющее большое внимание решению проблем экологии.

Установлено, что основными факторами, влияющими на изменение распределения ОСО в атмосфере Земли, являются изменения реакционных потоков катализаторов (в основном это атомарный хлор, радикалы ОН, оксиды азота), формирующихся в стратосфере, в результате протекающих в ней фотохимических реакций с участием веществ, природного и техногенного происхождения, поступающих из тропосферы [2]. Данные вещества формируются в нижних слоях тропосферы, у земной поверхности, и в ее пределах переносятся конвекционными воздушными потоками [3]. Однако, на сегодняшний день вопрос о том, как именно осуществляется перенос по вертикали веществ-катализаторов в стратосфере однозначного ответа не имеет.

Погосян Х. П. высказал предположение о ведущем значении в данном процессе адвекции тропического воздуха через разрывы тропопаузы, расположенные над субтропическими струйными течениями [4]. Эта теория, однако, не объясняет процесс дальнейшего переноса веществ из нижних слоев стратосферы в ее средние и верхние слои, где сосредоточена основная масса озона.

По мнению Жадина Е. А., между слоями стратосферы рассматриваемые вещества переносятся планетарными и гравитационными волнами, возникающими при взаимодействии струйных течений с орографическими или барическими неоднородностями [5]. Из-за значительной длины и нелинейности распространения планетарных и гравитационных волн, их волновой профиль при удалении от источника значительно трансформируется [6]. Вследствие чего в стратосфере образуются турбулентные вихри, способные разносить вещества по всей ее толще.

Основной причиной образования барических неоднородностей в тропосфере, является пространственная изменчивость потоков тепла и водяного пара, поступающих в нее с поверхности Мирового океана. Существование зависимости между изменчивостью распределения ОСО и распределением поверхностных температур в Мировом океане подтверждено многими исследователями [7]. Это позволяет предполагать возможность использования данной зависимости при мониторинге состояния ОСО над многими регионами планеты. Однако, районы Мирового океана, в которых изменения поверхностных температур значимо влияют на вариации ОСО над тем или иным регионом мира, до сих пор не выявлены, что не позволяет упомянутую возможность реализовать на практике.

Атлантический океан составляет значительную часть Мирового океана, оказывающую непосредственное влияние на атмосферу над Европой, в том числе над территорией Польши. Вследствие этого целесообразно изучить возможности использования результатов измерения поверхностных температур данного океана при мониторинге вариаций ОСО над Польшей.

Результаты измерений поверхностных температур различных районов Атлантиче-

ского океана, в виде временных рядов среднемесячных значений аномалий этих характеристик, усредненных по площади трапеции площадью $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, представлены в свободном доступе в Интернете [8].

Принимая во внимание изложенное, объектом данного исследования являлись межгодовые изменения распределений среднемесячных значений ОСО над Польшей, а также поверхностных температур различных районов Атлантического океана.

Предметом исследования являлось изучение на примере Польши возможности моделирования изменений распределения в атмосфере среднемесячных значений ОСО с учетом вариаций поверхностных температур значимых (оказывающих наиболее ощутимое влияние на вариации распределения ОСО над тем или иным регионом мира) районов Атлантического океана.

Цель исследования составляет выявление значимых районов Атлантического океана, и на основании информации об изменениях поверхностных температур в этих районах моделирование и оценка точности результатов вариации распределения ОСО над Польшей.

Для достижения цели был поставлен и решен ряд задач:

1. Выявление значимых районов Атлантического океана, которые существенно влияют на вариации ОСО над большинством районов Польши, а именно межгодовое изменение среднемесячных поверхностных температур совпадают со значительными изменениями ОСО.

2. Идентификация моделей межгодовых изменений ОСО над Польшей.

3. Моделирование изменения распределения ОСО над территорией Польши и оценка устойчивости к временным сдвигам идентифицированных моделей.

Методика исследования

Один из наиболее универсальных методов математического моделирования для анализа связи между несколькими независимыми и зависимой переменной является метод множественных регрессий [9]. Данный метод может быть применен также для составления прогнозов, при условии, что факторы, которые учитываются как аргу-

менты прогностической модели, связаны с изучаемым процессом причинно. Доказать наличие причинных связей между таким природным процессом, как изменения ОСО над Польшей и иными природными процессами, очень сложно, а во многих случаях и невозможно. В тоже время установить

наличие статистической связи между ними гораздо проще.

Использование в множественно-регрессионной модели процесса в качестве аргументов факторов, имеющую с ним статистическую связь, не гарантирует ее применимость в задачах прогнозирования. Тем не менее, вероятность ее применимости тем выше, чем более сильными являются учитываемые при моделировании статистические связи. Вследствие этого было признано допустимым применение данный метод при разработке методики прогнозирования изучаемого процесса.

Данная методика включает два этапа.

На первом этапе с использованием метода корреляционного анализа решается первая задача: среди всех районов Атлантического океана, ограниченных ячейками координатной сетки с шагом 50, ищутся те, в которых межгодовые изменения их поверхностных температур значимо статистически связаны с тем или иным сегментом атмосферы над территорией Польши размером 10x10. При этом значимыми признавались связи, которым соответствует значение коэффициента парной корреляции, превышающее уровень 99% порога, установленного по критерию Стьюдента, с учетом числа степеней свободы соответствующих временных рядов.

Далее среди выявленных районов устанавливаются те, в которых изменения температур значимо связаны с вариациями ОСО на совпадающих отрезках времени не менее чем в 75% подобных сегментов атмосферы. Именно они и рассматривались далее как значимые.

На втором этапе осуществляется идентификация прогностических моделей межгодовых изменений среднемесячных ОСО в том или ином месяце, которые соответствуют каждому сегменту атмосферы над территорией Польши и ее границами.

Как прогностическая модель использовано линейное уравнение множественной регрессии, которое имеет вид:

$$Y(t) = c_0 + c_1x_{i,1}(t) + c_2x_{i,2}(t) + \dots + c_Nx_{i,N}(t) \quad (1)$$

где c_i – действительные константы, которые выбраны так, чтобы сумма квадратов отклонений $z(t) = Y(t) - y(t)$ для всех моментов времени t , в которые производились наблюдения, была минимальной;

$y(t)$ – временной ряд каждого прогнозируемого процесса за период 1979-2008 гг., а $Y(t)$ – его модель;

$x_i(t)$ – состояние в момент времени t некоторого процесса, который значимо статистически связан с $y(t)$.

Как аргументы модели (1) использованы фрагменты временных рядов среднемесячных поверхностных температур значимых районов Мирового океана в некотором, совпадающем по времени с $y(t)$ месяце, за период 1979-2008 гг.

Прогнозирование осуществлялось на 2009 и 2010 гг., результаты спутникового мониторинга ОСО над Польшей этих лет доступны в Интернете, что позволяет осуществить проверку точности прогноза.

Предполагалось, что количество аргументов модели(1) равно числу значимых районов – N , а временной ряд каждого из них содержит M членов ($M = 2N$). Тогда коэффициенты модели (1) рассчитывают как компоненты $(N+1)$ -мерного вектора C , который является решением векторно-матричного уравнения:

$$B = A * C, \quad (2)$$

где C – $N+1$ - мерный вектор,

A – матрица $(N+1) \times (N+1)$

$$A = \begin{Bmatrix} M & \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,1} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,1} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^M x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,N} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,N} \end{Bmatrix}$$

Упомянутое решение имеет вид:

$$C = A^{-1} * B, \quad (3)$$

здесь A^{-1} матрица, которая является обратной по отношению к A . В нахождении для каждого рассматриваемого района Польши соответствующего вектора C и состояла вторая задача.

Прогнозирование осуществлялось путем подстановки в соотношение (1) членов временных рядов его аргументов, соответствующих 2009 и 2010 гг. Значения ОСО рассчитаны для каждого месяца и каждого района Польши. Для каждого из них оценены отклонения прогнозов от фактических значений.

Как фактический материал использованы временные ряды среднемесячных значений аномалий поверхностных температур всех районов Атлантического океана, соответствующих квадратам координатной сетки размерами 50x50, полученные из [8]. Рассматривались районы, где временные ряды за период 1979-2010 гг. не содержат пропусков. Также применены временные ряды

среднемесячных значений ОСО над каждым квадратом 1°x1° земной поверхности, центр которого расположен между параллелями 55° N и 49° N, а также между меридианами 14° E и 24° E, полученные из [1]. Рассматриваемый сегмент атмосферы полностью перекрывает всю территорию Польши с сопредельными районами Германии, Украины и Беларуси.

Результаты исследования

При решении первой задачи выявлены, с использованием изложенной методики, районы Атлантического океана, в которых межгодовые изменения их среднемесячных поверхностных температур значимо статистически связаны с совпадающими по времени вариациями ОСО в наибольшем коли-

честве сегментов земной атмосферы, соответствующие всем месяцам года. Установлено, что наименьшее количество таких районов соответствует июню, наибольшее – декабрю. Координаты центров значимых районов для этих месяцев приведены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты центров значимых районов

№	Широта	Долгота	Кол-во сегментов	№	Широта	Долгота	Кол-во сегментов
Июнь							
1	17.5 N	87.5 W	10890	2	52.5S	42.5 W	12570
Декабрь*							
1	67.5N	5.5E	22889	11	37.5N	52.5W	22264
2	67.5N	7.5E	24708	12	37.5N	47.5W	23120
3	62.5N	12.5W	24521	13	37.5N	42.5W	21524
4	57.5N	2.5W	20809	14	32.5N	22.5E	28041
5	52.5N	42.5W	19809	15	2.5N	2.5W	20572
6	42.5N	57.5W	19773	16	7.5S	12.5E	29685
7	42.5N	37.5W	20682	17	17.5S	7.5E	21181
8	37.5N	12.5E	21570	18	17.5S	12.5E	28326
9	37.5N	17.5E	33878	19	22.5S	12.5E	21993
10	37.5N	22.5E	24358	20	47.5S	7.5 W	20195

*) Общее количество выявляемых районов в декабре = 58. В таблице приведены лишь те из них, которые влияют более чем на 19000 сегментов озоносферы.

Из таблицы 1 видно, что в Атлантическом океане значимые районы расположены в Карибском и Средиземном морях, в море Лабрадор, в районах Бенгельского, Гвинейского и Норвежского течений, течения Гольфстрим, а также в районе течения Западных ветров.

При решении второй задачи для каждого месяца идентифицированы модели (1) изменений ОСО во всех рассматриваемых сегментах атмосферы.

С помощью идентифицированных моделей рассчитаны прогнозируемые на июнь

2010 г. значения ОСО для различных районов Польши (Табл. 2).

Из таблицы 2 видно, что наибольшие значения ошибок прогноза (9.2 е.Д.) соответствуют району Польши с координатами центра 55°N, 24 °E. Среднее по всей территории Польши значение ошибки прогноза составляет 2.48 е.Д., что меньше погрешности измерения ОСО, обеспечиваемой спектрофотометром Добсона.

Таблица 2

Фактические среднемесячные значения ОСО над районами Польши в июне 2010 г., результаты их моделирования (с учетом поверхностных температур значимых районов Атлантики), значения его ошибок

Факт	14°E	16°E	18°E	20°E	22°E	24°E
55°N	355.3	354.8	354.6	353.7	354.8	355.2
53°N	350.9	350.9	351.7	351.5	351.6	352.1
51°N	348.8	348.9	350.2	349.8	350.5	349.8
49°N	349.9	350.3	350.9	350.8	350.2	349.8
МОДЕЛИРОВАНИЕ						
55°N	352.6	351.8	348.8	346.8	345.9	346.0
53°N	352.5	352.2	350.7	350.0	350.0	348.5
51°N	350.9	349.5	350.0	351.8	350.6	350.7
49°N	351.0	350.6	350.9	352.3	351.9	351.8
ОШИБКА В 2010 Г.						
55°N	2.8	2.9	5.8	6.8	8.9	9.2
53°N	-1.6	-1.3	1.0	1.5	1.6	3.6
51°N	-2.1	-0.6	0.2	-2.0	-0.1	-0.9
49°N	-1.1	-0.3	-0.1	-1.5	-1.7	-2.0

Выводы

Таким образом, установлено:

1. В Атлантическом океане существуют районы, в которых межгодовые изменения его поверхностных температур значимо влияют на совпадающие по времени вариации ОСО в различных сегментах атмосферы над Польшей, что подтверждает гипотезы о волновой природе механизма распре-

деления в стратосфере веществ разрушающих озон.

2. При сдвигах не более 2-х лет ошибки моделирования не превышают абсолютную погрешность наиболее точных средств измерения. Это подтверждает эффективность применения описанной методики при прогнозировании рассматриваемого процесса.

Литература

1. <http://www.woudc.org>
2. Александров Э. Л. Озонный щит Земли и его изменения / Э. Л. Александров, Ю. А. Израэль, И. Л. Кароль, А. Х. Хргиан. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 288 с.
3. Школьный С. П. Фізика атмосфери/ С. П. Школьний.– Одеса, 1997.– 698с.
4. Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы./ Х. П. Погосян. – Л., 1972.
5. Жадин Е. А. Влияние межгодовых вариаций температуры поверхности океана на циркуляцию атмосферы и озоновый слой. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Долгопрудный. – МФТИ - 211с.

6. Лайтхилл М. Нелинейная теория распространения волн./М. Мир. – 1970. – 230с.
7. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы/ К. Моханакумар. Перевод с английского Р. Ю. Лукьяновой, под ред. Г. В. Алексеева./ М. – ФИЗМАТЛИТ. – 2011. – 451с.
8. <http://reanalyses.org/ocean>
9. Норман Дрейпер, Гарри Смит. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. – 3-е изд. – М.: «Диалектика», 2007. – 912 с.

Надійшла до редколегії 14.04.2014

