

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЗОН ОКЕАНА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

В.Н. Малинин, В.Ю. Шмакова

Российский государственный гидрометеорологический университет,
Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79; malinin@rshu.ru

Реферат. Цель работы состоит в выявлении межгодовой изменчивости суммарной теплоотдачи из океана в атмосферу в Бермудской, Ньюфаундлендской и Норвежской энергоактивных зонах океана (ЭАЗО) и построении статистических моделей с наиболее важными климатическими параметрами Северной Атлантики – индексом Гольфстрима, атлантической мультидекадной осцилляцией, североатлантическим колебанием и давлением в центре Исландского минимума. В качестве исходных данных использовался архив NCEP–DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2). Из этого архива выбирались среднемесячные значения турбулентного потока тепла из океана в атмосферу и затрат тепла на испарение за период 1980–2017 гг. для 29 квадратов Бермудской ЭАЗО, 26 квадратов Ньюфаундлендской ЭАЗО и 30 квадратов Норвежской ЭАЗО. Для всех трех ЭАЗО характерен рост годовых значений суммарной теплоотдачи. Максимальный тренд отмечается в Бермудской зоне, который равен $1.137 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ год})$, минимальный тренд – в Ньюфаундлендской зоне, $0.50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ год})$. За рассматриваемый период времени теплоотдача в Бермудской зоне увеличилась на $42 \text{ Вт}/\text{м}^2$ за 38 лет, т.е. на 12%. Корреляция между центрами зон является невысокой. Для построения статистических моделей с климатическими параметрами Северной Атлантики использовался метод деревьев решений (ДР), который не получил пока распространения в гидрометеорологических исследованиях. Было выявлено, что он обладает существенными преимуществами по сравнению с классическим методом множественной линейной регрессии. Метод ДР обеспечивает более высокую точность описания функции отклика при одинаковом числе переменных, делает возможным визуализацию получаемых результатов и более понятную их интерпретацию. Установлено, что теплоотдача в ЭАЗО с высокой степенью точности описывает межгодовые колебания климатических параметров в СА – индексы Гольфстрима, атлантической мультидекадной осцилляцией, североатлантического колебания и давления в центре Исландского минимума. Каждый из этих параметров с точностью примерно 70% дисперсии описывается среднегодовыми значениями суммарной теплоотдачи в трех квадратах ЭАЗО. Всего 11 квадратов в энергоактивных зонах достаточно, чтобы описать весь комплекс важнейших климатических параметров в Северной Атлантике с приемлемой для практических целей точностью. Это доказывает важнейшую роль энергоактивных зон океана в формировании короткопериодных колебаний климата.

Ключевые слова. Северная Атлантика, энергоактивные зоны, океан, теплоотдача океана в атмосферу, метод деревьев решений, индекс Гольфстрима, североатлантическое колебание, атлантическая мультидекадная осцилляция, Исландский минимум.

VARIABILITY OF THE ENERGY-ACTIVE OCEAN ZONES IN NORTH ATLANTIC

V.N. Malinin, V.Yu. Shmakova

Russian State Hydrometeorological University,
79, Voronezhskaya str., 192007, St. Petersburg, Russia; malinin@rshu.ru

Abstract. The aim of the work is to identify the interannual variability of the total heat transfer from the ocean to the atmosphere in the Bermuda, Newfoundland and Norway energy-active zones of the ocean (EAZO) and to construct statistical models with the most important climatic parameters of the North Atlantic, namely, the Gulf Stream index, Atlantic multi-decadal oscillation, North Atlantic oscillation and pressure at the center of Icelandic minimum. The NCEP-DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) was used as the input data. The mean monthly values of the turbulent heat flux from the ocean to the atmosphere and the heat loss for evaporation for 29 squares of Bermuda EAZO, 26 squares of Newfoundland EAZO and 30 squares of Norwegian EAZO for 1980-2017 were taken from this archive. An increase in annual values of the total heat transfer were typical for all three EAZO. Maximal trend is observed in the Bermuda zone, which is $1.137 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ year})$, while minimal trend is found in the Newfoundland zone ($0.50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ year})$). During the time period under review, the heat transfer in the Bermuda zone increased by $42 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ year})$, i.e., by 12%. Correlation between the centers of zones is not high. For the construction of statistical relationships (models) to climatic parameters of the North Atlantic, the decision tree method was employed, which is not yet common in hydrometeorological studies. It is found that the method has significant advantages vs. the classical linear regression method. The decision tree method provides higher precision in describing the response function using the same number of variables and ensures visualization and easier interpretation of results. It is found that the heat transfer in EAZO with a high degree of accuracy describes the interannual fluctuations of some climatic indices: Gulf Stream index, Atlantic Multi-decadal Oscillation, the North Atlantic Oscillation and the pressure in the center of the Icelandic minimum. Each of those parameters can be described with the average annual values of the total heat transfer in three squares of the EASO with accuracy of approximately 70% of the variance. Just 11 squares in the energy-active zones are sufficient to describe the entire set of the most important climatic parameters in the North Atlantic with accuracy acceptable for practical purposes. This proves the crucial role of the energy-active zones of the ocean in the formation of short-term climate fluctuations.

Keywords. North Atlantic, energy-active zones, ocean, atmosphere, heat transfer, decision tree method, Gulf Stream index, North Atlantic oscillation, Atlantic multi-decadal oscillation, Icelandic minimum.

Введение

Впервые идея о существенной пространственной дифференциации теплообмена океана с атмосферой высказывалась в работах профессора ЛГМИ В.В. Тимонова еще в 60-е годы прошлого столетия. В сконцентрированном виде она нашла свое отражение в 1970 году в работе В.В. Тимонова (Тимонов и др., 1970). Особо активные области океана, где обмен энергией с атмосферой осуществляется наиболее интенсивно, были названы очагами взаимодействия океана и атмосферы. Основой для их выделения послужили карты суммарной теплоотдачи в атмосферу за счет турбулентного потока тепла (Р) и затрат тепла на испарение (LE). В Северной Атлантике (СА) выделено 4 очага: Бермудский, Ньюфаундлендский, Западно-Гренландский и Норвежский. Изменения деятельности этих очагов должны быть показательными, а в некоторой мере и определяющими для крупномасштабных изменений состояния системы океан – атмосфера, в том числе для разработки долгосрочных прогнозов погоды и климата.

Данная идея довольно быстро получила признание (Бирман, Позднякова, 1985; Бирман и др. 1983; Кондратьев, Козодеров, 1984; Лаппо и др., 1990; Малинин, Смирнов, 1977; Малинин, 1986). Подлинный бум начался после того, как президент Академии наук бывшего Советского Союза на основе теоретической модели термического взаимодействия атмосферы с океанами и континентами подтвердил существование в океане локальных районов с резко выделяющимся теплообменом с атмосферой (Марчук, Скиба, 1976). Полученные результаты позволили Г.И. Марчуку сформулировать концепцию энергоактивных зон Мирового океана, которая стала методологической основой наблюдательной части программы «Разрезы» – наиболее крупного советского естественнонаучного проекта, целью которого было исследование роли океана в короткопериодных колебаниях климата и долгосрочных прогнозах погоды. Почти два десятилетия весь научно-исследовательский флот страны, многие научные учреждения Гидрометслужбы и Академии наук работали на программу «Разрезы», было получено множество уникальных научных результатов, но в начале 90-х годов в результате развала Советского Союза программа была свернута. И про нее забыли. На многие годы. Довольно подробные описания ЭАЗО в СА на начало 80-х годов даны в работах (Алексеев и др., 1985; Баранов и др., 1985; Бурков, 1985).

На наш взгляд, значение энергоактивных зон океана (ЭАЗО) для понимания короткопериодных колебаний климата настолько значительно, что их концепция может быть реанимирована с использованием современных технических средств и прежде всего, результатов дистанционного зондирования океана и атмосферы из космоса. Действительно, в настоящее время можно указать несколько десятков глобальных архивов, которые содержат

компоненты теплового баланса океана за длительный период времени в узлах сетки с различным пространственно-временным разрешением. Их использование позволяет сделать то, что было невозможно раньше в рамках программы «Разрезы», а именно, более подробно изучить пространственно-временную изменчивость ЭАЗО. Отметим, что свидетельством возникшего интереса к ЭАЗО являются опубликованные в последние годы работы (Gulev et al., 2013; Gulev, Latif, 2015).

В данной работе рассматривается межгодовая изменчивость суммарной теплоотдачи в Бермудской, Ньюфаундлендской и Норвежской энергоактивных зонах Северной Атлантики для условий интенсивного глобального потепления и осуществляется оценка их влияния на комплекс климатических параметров (индекс Гольфстрима, атлантическая мультидекадная осцилляция, североатлантическое колебание, давление в центре Исландского минимума) на основе построения статистических моделей (деревьев решений).

Материалы и методы

Для оценки значений турбулентного потока тепла (P) и затрат тепла на испарение (LE) использовался архив NCEP–DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) (Kanamitsu et al., 2002). NCEP-NCAR Reanalysis-2, охватывает спутниковый период с 1979 г. по настоящее время с пространственным разрешением 1.9° по широте и долготе и использует обновленные модели прогноза, ассимиляции данных, улучшенные диагностические результаты, в том числе исправления ошибок обработки, выявленных в NCEP-NCAR Reanalysis-1. В Reanalysis-2 сделаны значительные уточнения в параметрах потоков для суши и океана у земной поверхности. Reanalysis-2 имеет постоянную поддержку и его данные находятся в свободном доступе по адресу (http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/NCEP/NCEP2/monthly/gaussian_grid/dlwrf). Из данного архива выбирались среднемесячные значения турбулентного потока тепла из океана в атмосферу и затрат тепла на испарение за период 1980-2017 гг. Как и в большинстве других архивов, расчет потоков в Reanalysis-2 осуществлялся с помощью традиционного аэродинамического метода, несомненным достоинством которого является использование минимума гидрометеорологической информации (Kanamitsu et al., 2002).

В качестве климатических факторов использовались: индексы Гольфстрима (GSNW), североатлантического колебания (CAK), атлантической мультидекадной осцилляции (AMO), давление в центре Исландского минимума ($P_{им}$).

Индекс Гольфстрима (Gulfstream North Wall, GSNW) характеризует положение хорошо идентифицируемой северной границы течения («North Wall» или «северная стена»), т.е. косвенно отражает мощность течения. Данный индекс, предложенный Тейлором и Стефенсом в 1980 г. (Taylor, Stephens, 1980), рассчитывается в морской лаборатории Плимута (Великобритания), его среднемесячные значения представлены на сайте <http://www.pml-gulf->

stream.org.uk. Более подробное описание индекса Гольфстрима дается в работе (Карлин и др., 2013).

Индекс североатлантического колебания (САК) представляет собой разность атмосферного давления между центрами Азорского максимума и Исландского минимума. Он характеризует интенсивность зонального геострофического переноса воздушных масс в умеренных широтах над Северной Атлантикой (СА). Существует несколько вариантов этого индекса. Мы использовали индекс САК в виде разности давления между Лиссабоном и Стиккисхоульмюр (Исландия), который имеет длительную продолжительность и непрерывную поддержку (Hurrell, 2003).

Давление в центре Исландского минимума выбиралось из справочной монографии «Мониторинг общей циркуляции атмосферы, северное полушарие», подготовленной во ВНИИГМИ-МЦД (Мониторинг..., 2012). В ней содержатся среднемесячные данные широты, долготы и давления в 5 центрах действия атмосферы северного полушария с 1891 года.

Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) представляет долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана ($0 - 70^{\circ}$ N). АМО оказывает влияние на температуру воздуха и интенсивность осадков на большей части Северного полушария, как Северной Америки, так и Европы. Среднемесячные данные АМО, которые имеют постоянную поддержку, представлены на сайте <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.KAPLAN/.EXTENDED/.v2/.ssta/>.

Для построения статистических моделей климатических индексов в зависимости от годовых значений суммарной теплоотдачи в ЭАЗО использовался метод деревьев решений (decision trees). Он относится к числу наиболее популярных методов мультидисциплинарной области Data Mining, возникшей и развивающейся на базе достижений прикладной статистики, распознавания образов, методов искусственного интеллекта, нейронных сетей, теории баз данных и др. Метод деревьев решений (ДР) может быть использован для решения многих гидрометеорологических задач, в частности задач классификации и прогнозирования. Однако пока что он не получил широкого применения в гидрометеорологических исследованиях. Можно отметить лишь работы С.М. Гордеевой и В.Н. Малинина (Гордеева, Малинин, 2018, 2016), посвященные построению прогностических моделей годового стока крупных рек. Было выявлено, что он обладает существенными преимуществами по сравнению с классическим методом множественной линейной регрессии (МЛР). Метод ДР обеспечивает, как правило, более высокую точность описания функции отклика при одинаковом числе переменных, делает возможным визуализацию получаемых результатов и более понятную их интерпретацию. Описание этого метода дается в работах (Bramer, 2007; Breiman et al., 1984). На наш взгляд, наиболее удобно для расчетов использовать алгоритм CART в пакете Statistica с априорными вероятностями, пропорциональными численности классов, и ценой ошибки классификации одинаковой для всех классов (Interactive Trees. Electronic resource).

Результаты

Межгодовая изменчивость суммарной теплоотдачи в ЭАЗО

Самой мощной из всех ЭАЗО является *Бермудская ЭАЗО*, которая располагается севернее Бермудских островов, на границе зон тропического и субтропического климата. Зона вытянута вдоль теплого течения Гольфстрим (рис. 1). Выносы довольно холодного воздуха с американского континента на теплую водную поверхность создают максимальный контраст между температурой воздуха в приводном слое атмосферы и температурой поверхности океана (ТПО). Это способствует формированию мощного потока тепла в атмосферу. Так, в центре зоны суммарная теплоотдача ($P+LE$) для среднемноголетних годовых условий превышает $358.7 \times 12 > 4000 \text{ Вт/м}^2$ (табл. 1). Однако межгодовая изменчивость ее невелика. Коэффициент вариации равен 8.1%.

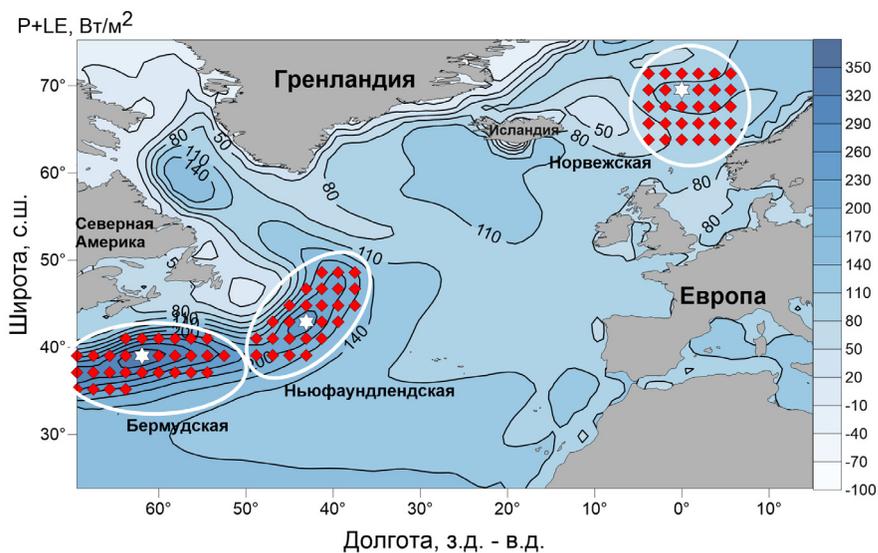


Рисунок 1. Среднемноголетнее распределение годовых значений суммарной теплоотдачи ($P+LE$) в Северной Атлантике за 1980-2017 гг. в Вт/м^2

Ромбики – квадраты, данные в которых использованы при построении моделей деревьев решений. Звездочки – центры ЭАЗО с максимальной теплоотдачей

Таблица 1. Первичные статистические характеристики среднегодовых значений теплоотдачи из океана в атмосферу в центрах ЭАЗО в Вт/м^2

ЭАЗО	Среднее	СКО	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
Бермудская Центр $\varphi=39^\circ \text{ N}$, $\lambda = 61.9^\circ \text{ W}$	359	29	8	304	438
Ньюфаундлендская Центр $\varphi=42.9^\circ \text{ N}$, $\lambda = 43.1^\circ \text{ W}$	251	26	10	173	299
Норвежская Центр $\varphi=69.5^\circ \text{ N}$, $\lambda = 0^\circ$	125	15	12	95	163

Ньюфаундлендская ЭАЗО находится в дельте Гольфстрима на стыке двух течений: холодного Лабрадорского и теплого Северо-Атлантического. Естественно, она уступает по мощности Бермудской ЭАЗО. Район Ньюфаундлендской зоны характеризуется интенсивной циклонической деятельностью, которая проявляется в больших скоростях ветра и неустойчивом состоянии атмосферы, особенно в осенне-зимний период. Это в сочетании с миграциями полярного гидрологического фронта способствует формированию значительных колебаний теплообмена с атмосферой. Суммарная теплоотдача для среднесуточных годовых условий в центре зоны превышает 250 Вт/м^2 , причем межгодовая изменчивость относительно невелика. Коэффициент вариации равен 10%.

Норвежская энергоактивная зона располагается в акватории Норвежского и части акватории Северного моря, простирается почти на 20° с севера на юг. Формирование климатических условий в зоне происходит в основном под влиянием теплового Норвежского течения и Исландского центра действия атмосферы. Здесь отмечается усиленный циклогенез, формирование и углубление циклонических образований, вследствие чего большую часть года преобладают значительные скорости ветра, а зимой нередко интенсивные шторма, что приводит к резкому росту теплообмена с атмосферой. Именно отсюда в Полярный бассейн и на Европейскую территорию России (ЕТР) приходит основная часть атлантических циклонов, приносящих интенсивные осадки. Благодаря относительно теплой поверхности моря отмечается довольно высокая теплоотдача. В центре зоны среднегодовая суммарная теплоотдача для среднесуточных условий в центре зоны составляет 125 Вт/м^2 . Хотя в интенсивности Норвежская ЭАЗО уступает другим зонам, однако соседство с Полярным бассейном и ЕТР заставляет считать ее климатическое значение для них исключительно важным.

На рис. 2 приводится межгодовой ход среднегодовых значений теплоотдачи в центрах ЭАЗО за период 1980-2017 гг., соответствующий эпохе интенсивного глобального потепления. Для всех трех ЭАЗО характерен рост значений $P+LE$. Однако для Ньюфаундлендской зоны тренд незначим по критерию Стьюдента. Максимальный коэффициент тренда отмечается в Бермудской зоне, который равен $1.14 \text{ Вт/м}^2\text{год}$, минимальный – в Ньюфаундлендской зоне ($0.50 \text{ Вт/м}^2\text{год}$). За рассматриваемый период времени теплоотдача в Бермудской зоне увеличилась на $42 \text{ Вт/м}^2\text{год}$, т.е. на 12%. Корреляция между центрами зон является невысокой. Между Бермудской и Ньюфаундлендской зонами $r=0.37$, между Бермудской и Норвежской $r=0.44$. Полностью отсутствует корреляция между Ньюфаундлендской и Норвежской зонами.

Отметим, что для всех трех временных рядов свойственны малоустойчивые короткопериодные циклические колебания. В Бермудской зоне максимальный вклад в дисперсию исходного ряда (17%) дает 2-летняя цикличность, в Ньюфаундлендской зоне цикличность с периодом 6.3 лет, вклад которой составляет 16%, в Норвежской зоне вклад 2-летней цикличности составляет 10% (табл. 2). В Бермудской зоне на долю случайных колеба-

ний приходится 34% дисперсии исходного ряда, в Ньюфаундлендской – почти 55%, в Норвежской – 48%. По сути это означает, что межгодовая изменчивость теплоотдачи в ЭАЗО в значительной степени формируется случайным образом, т.е. большим числом не поддающихся учету разнообразных факторов. Несмотря на это, как будет показано ниже, ЭАЗО имеют сильное влияние на межгодовые колебания климата в СА.

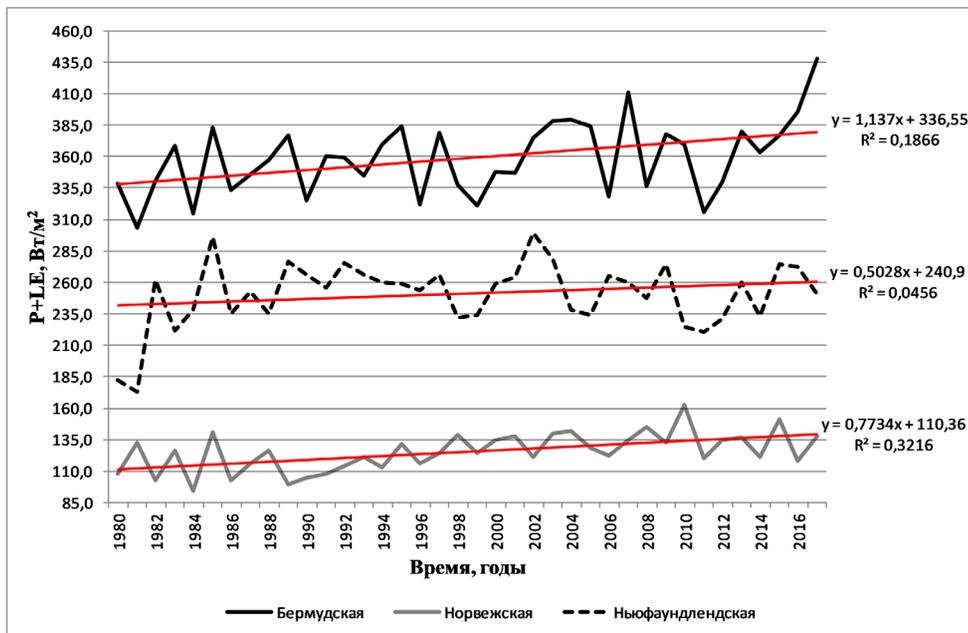


Рисунок 2. Межгодовой ход среднегодовых значений суммарной теплоотдачи (P+LE) в центрах ЭАЗО Северной Атлантики за 1980-2017 гг. в Вт/м²

Таблица 2. Оценки вклада в дисперсию временного ряда годовых значений суммарной теплоотдачи центров ЭАЗО гармоник и тренда

Бермудская ЭАЗО		Ньюфаундлендская ЭАЗО		Норвежская ЭАЗО	
Период гармоник, годы	Вклад в дисперсию ряда, %	Период гармоник, годы	Вклад в дисперсию ряда, %	Период гармоник, годы	Вклад в дисперсию ряда, %
2.0	17	3.5	12	2.0	10
2.5	9	6.3	16	2.5	10
3.2	13	7.6	13	---	---
12.7	9	---	---	---	---
Тренд	19	---	5	---	32
Сумма	66	---	46	---	53

Периоды цикличности в данном анализе были оценены как периоды фурье-гармоник, из которых период первой гармоники равен длине ряда. Такие периоды в общем случае не связаны с временными масштабами физических процессов в системе.

Построение моделей деревьев решений (decision trees) климатических параметров с суммарной теплоотдачей в ЭАЗО

Индекс Гольфстрима (GSNW или северная стена). В качестве исходной выборки послужили среднегодовые значения суммарной теплоотдачи в 29 точках Бермудской ЭАЗО (рис.1) за 1980-2014 гг., по которым строилась модель ДР для GSNW. На рис. 3 представлено распределение значений цены ошибок обучения и цены ошибки кроссвалидации в зависимости от количества узлов дерева. Полное дерево номер 1 имеет 11 терминальных вершин и 10 нетерминальных, а последнее дерево номер 11 – только 1 вершину, что соответствует исходной выборке. Отметим, что терминальными вершинами называют такие узлы дерева, которые не принимают участие в его ветвлении, а нетерминальные, наоборот, являются вершинами ветвления. Из рис. 3 следует, что с увеличением числа вершин цена ошибок обучения (Resubstitution cost) быстро уменьшается. Очевидно, чем «толще» становится дерево, тем точнее оно будет описывать зависимую переменную. В принципе, величина Resubstitution cost обратно пропорциональна коэффициенту детерминации модели. Распределение ошибок кроссвалидации (CV-cost) показывает, что дерево номер 8 имеет наименьшую ошибку независимых оценок, поэтому оно может быть принято как оптимальное.

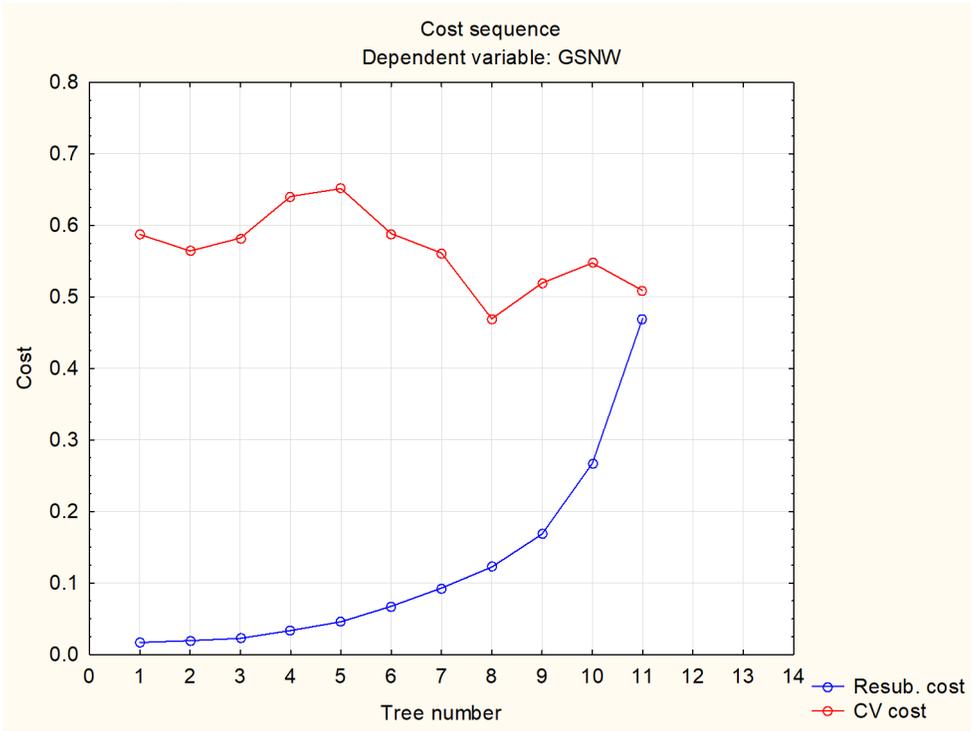


Рисунок 3. Значения цены проверки на обучающей выборке (Resubstitution cost) (1) и цены ошибки кросс-проверки (CV-cost) (2) в зависимости от числа узлов дерева решений для модели индекса Гольфстрима

Дополнительно для оценки точности воспользуемся стандартными статистическими характеристиками: коэффициентом детерминации и стандартной

ошибкой модели для исходной выборки, которые были рассчитаны для всех ДР (табл. 3). Как видно из табл. 3 уже на 1 шаге ошибка GSNW меньше СКО. Для оптимального дерева № 8 коэффициент детерминации $R^2=0.74$, а ошибка GSNW равна 0.5 СКО. Для полного решающего дерева ошибка GSNW всего лишь 0.19 СКО. Если точности оптимального дерева недостаточно, то можно выбрать дерево № 5, которое описывает 90% дисперсии исходного ряда GSNW.

Таблица 3. Статистические оценки для всех моделей деревьев решений индекса Гольфстрима в зависимости от годовых значений суммарной теплоотдачи в 29 квадратах Бермудской зоны за 1980-2014 гг.

№ шага	Номер дерева	Число вершин терминальных/ нетерминальных	Коэффициент детерминации модели дерева	Стандартная ошибка модели дерева в долях СКО	Стандартная ошибка модели МЛР в долях СКО
1	10	2/1	0.43	0.74	0.78
2	9	3/2	0.64	0.59	0.63
3	8	4/3	0.74	0.50	0.61
4	7	5/4	0.80	0.44	0.60
5	6	6/5	0.86	0.37	0.55
6	5	7/6	0.90	0.31	0.52
-	-	-	-	-	
10	1	11/10	0.96	0.19	

Оптимальное дерево 8, представленное на рис. 4, имеет довольно простой вид. На первом ветвлении разделителем выступает квадрат 1 (координаты центра $\varphi=37.1^\circ$ N, $\lambda=67.5^\circ$ W). Если суммарная теплоотдача в нем меньше 320 Вт/м^2 , то в 22 случаях из 35 индекс Гольфстрима чуть выше среднего значения исходного ряда ($X_{\text{GSNW}} = 0.25$), если больше 320.4 Вт/м^2 , то индекс в оставшихся 15 случаях принимает отрицательные значения со средним значением -0.34 . На втором ветвлении происходит уточнение формирования 22 значений индекса за счет квадрата 2 ($\varphi=41^\circ$ N, $\lambda=61.9^\circ$ W). Если в нем теплоотдача выше 240 Вт/м^2 , то отмечается 15 значений высоких значений индекса (среднее 0.86), из которых при третьем ветвлении (квадрат 3, $\varphi=39^\circ$ N, $\lambda=60^\circ$ W) выделяются 12 anomalно высоких значений индекса (среднее 1.03). Итак, есть довольно четкая интерпретация формирования anomalных значений GSNW. При теплоотдаче в квадрате 1 больше 320 Вт/м^2 наблюдаются отрицательные значения индекса, а теплоотдаче в квадрате 3 меньше 362 Вт/м^2 соответствуют anomalно положительные значения GSNW.

Отметим, что построение регрессионной модели индекса GSNW методом включения переменных подтвердило ее меньшую эффективность, ибо на всех шагах она имеет меньшую точность по сравнению с моделью ДР (табл. 3).

На рис. 5 приводится сопоставление фактических значений GSNW с их вычисленными значениями на шаге 3 (третье ветвление) и шаге 6 (шестое ветвление), которое наглядно показывает высокую точность аппроксимации GSNW методом ДР.

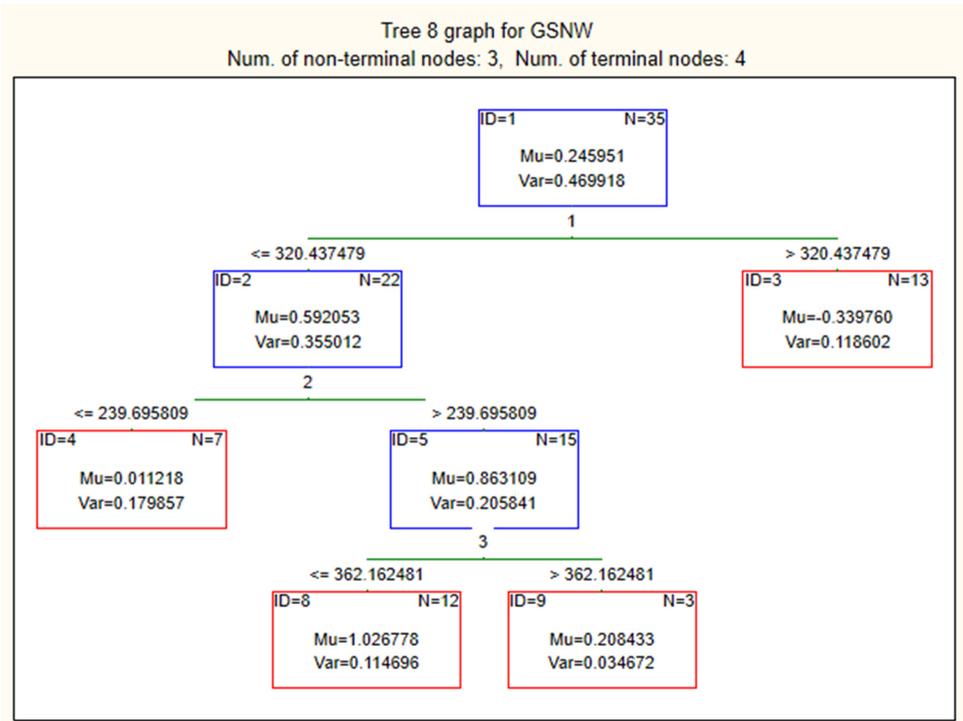


Рисунок 4. Дерево решений номер 8 (третий шаг ветвления), описывающее формирование индекса Гольфстрима в зависимости от годовых значений суммарной теплоотдачи в 29 квадратах Бермудской зоны за 1980-2014 гг.

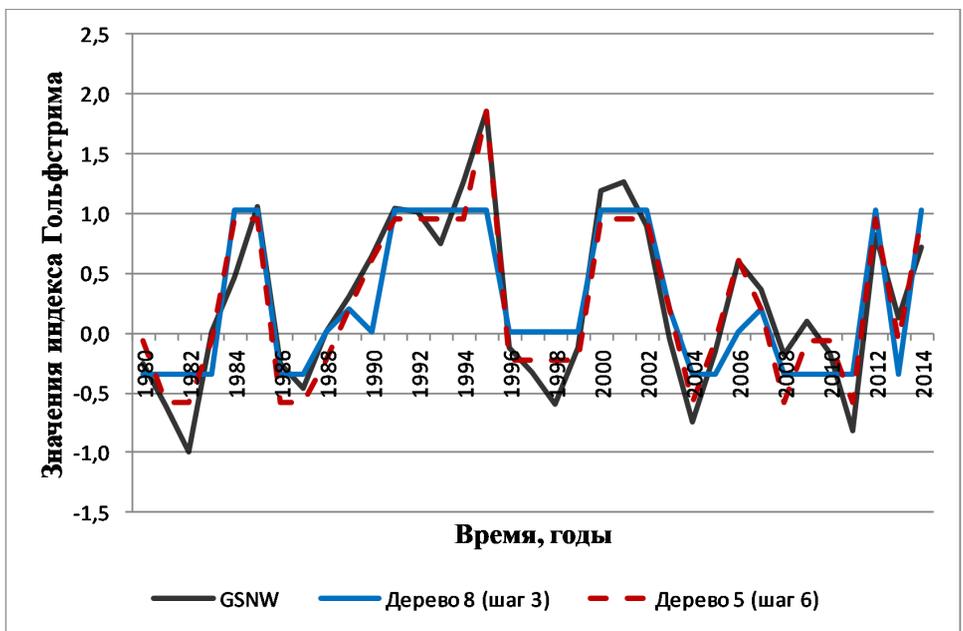


Рисунок 5. Сопоставление фактических и вычисленных для моделей ДР на 3 и 6 ветвлении значений индекса Гольфстрима GSNW

Индекс САК. В исходную выборку вошли среднегодовые значения суммарной теплоотдачи в 29 квадратах Бермудской ЭАЗО, в 26 квадратах Ньюфаундлендской ЭАЗО и 30 квадратах Норвежской ЭАЗО (рис. 1) за 1980-2017 гг. Все расчеты выполнены точно также как для индекса GSNW. Было установлено, что полное дерево состоит из 12 ветвлений, при этом оно описывает 96% дисперсии исходного ряда (табл. 4). Оптимальным дерево становится на третьем ветвлении, когда оно описывает 71% дисперсии САК со стандартной ошибкой 0.56 от СКО. На первом шаге ветвления разделителем выступает суммарная теплоотдача в квадрате 4 ($\varphi=44.8^\circ$ N, $\lambda=37.5^\circ$ W) Ньюфаундлендской зоны. Если суммарная теплоотдача в нем меньше 148 Вт/м^2 , то она описывает 9 отрицательных значений САК со средним значением -0.32, если больше, то она описывает 29 положительных значений САК (среднее 0.17). Второе ветвление обусловлено теплоотдачей в квадрате 5 ($\varphi=69.5^\circ$ N, $\lambda=1.9^\circ$ E), находящейся в Норвежской зоне, который отделяет 20 почти нулевых значений САК (среднее 0.05) от 9 высоких положительных значений САК (среднее 0.47). Разделителем третьего ветвления является 6 квадрат ($\varphi=35.2^\circ$ N, $\lambda=69.3^\circ$ W) в Бермудской зоне.

Таблица 4. Статистические оценки для моделей деревьев решений различных климатических индексов в зависимости от годовых значений суммарной теплоотдачи в энергоактивных зонах Северной Атлантики (курсивом выделены статистические оценки для оптимальных ДР)

№ шага	Североатлантическое колебание		Давление в центре Исландского минимума		Атлантическая мультideкадная осцилляция	
	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка в долях СКО	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка в долях СКО	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка в долях СКО
1	0.27	0.82	0.27	0.84	0.45	0.73
2	0.54	0.68	0.60	0.62	0.62	0.61
3	<i>0.71</i>	<i>0.56</i>	<i>0.70</i>	<i>0.54</i>	<i>0.75</i>	<i>0.49</i>
4	0.82	0.45	0.79	0.45	0.84	0.39
5	0.87	0.38	0.85	0.38	0.89	0.33
6	0.91	0.33	0.89	0.33	0.91	0.29
7	0.94	0.27	0.91	0.30	0.93	0.27
8	0.95	0.24	0.92	0.28	0.94	0.24
9	0.95	0.22	0.93	0.26	0.95	0.23
10	0.95	0.21			0.95	0.22

Давление в центре Исландского минимума ($P_{\text{им}}$). Для построения моделей ДР использовались значения годовой суммарной теплоотдачи в 30 квадратах Норвежской зоны, которые максимальным образом влияют на формирование Исландской депрессии. Исходная выборка бралась за 1980-2010 гг. Полное дерево $P_{\text{им}}$ состоит из 9 ветвлений ($R^2=0.93$, стандартная ошибка – 0.26 в долях от СКО). Оптимальная модель дерева, как и в предшествующих случаях, соответствует третьему шагу ветвления ($R^2=0.70$, стан-

дартная ошибка – 0.54 в долях от СКО). Номера квадратов суммарной теплоотдачи (7, 8 и 9 в порядке ветвления), описывающих оптимальное дерево, представлены на рис. 6.

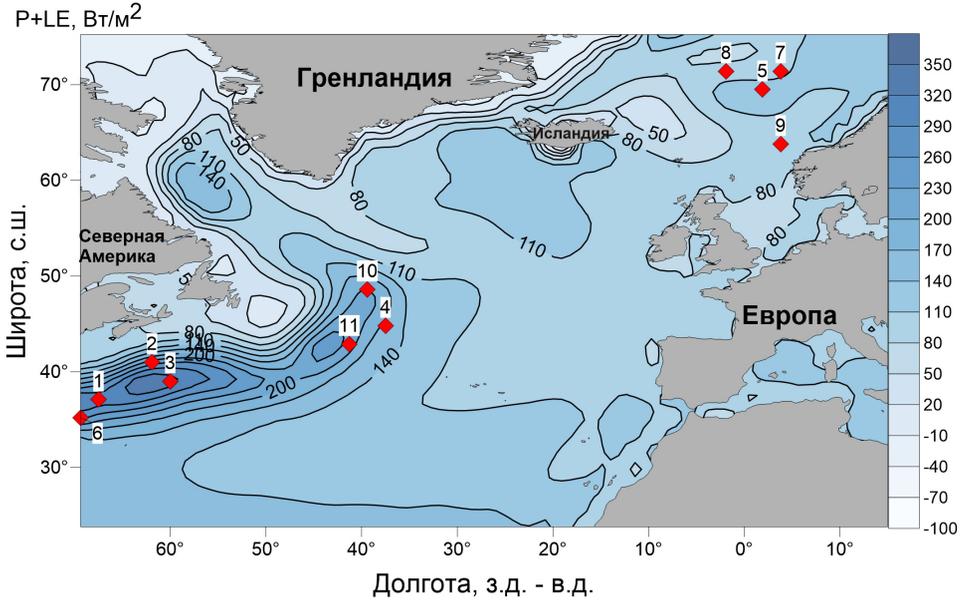


Рисунок 6. Реперные квадраты среднегодовых значений суммарной теплоотдачи из океана в атмосферу в ЭАЗО с высокой точностью описывающих комплекс из 4 климатических параметров (GSNW, САК, $P_{им}$, АМО)

Атлантическая мультидекадная осцилляция. В качестве исходной выборки использовались среднегодовые значения суммарной теплоотдачи во всех трех ЭАЗО Северной Атлантики (рис.1) за 1980-2017 гг. Результаты построения моделей ДР для АМО очень близки к результатам для других климатических индексов. Оптимальная модель дерева также соответствует третьему шагу ветвления ($R^2=0.75$, стандартная ошибка – 0.49 в долях от СКО). Квадраты суммарной теплоотдачи из океана в атмосферу (6, 10 и 11 в порядке ветвления), участвующих в формировании оптимального дерева решений, находятся во всех трех ЭАЗО и представлены на рис. 6.

Естественно, межгодовая изменчивость рассмотренных выше климатических параметров СА зависит не только от потоков тепла в ЭАЗО, но и от множества других процессов взаимодействия океана и атмосферы, причем набор влияющих факторов на климатические параметры будет существенно различаться. Однако полный учет всех факторов на климатические параметры возможен только в рамках построения гидродинамических моделей системы океан-атмосфера. В то же время локальная задача по оценке степени влияния годовых значений теплоотдачи в ЭАЗО на климат СА была довольно просто реализована в рамках статистического подхода. Так, анализ межгодовой изменчивости параметров GSNW, САК, $P_{им}$, АМО показал, что доля случайной компоненты в дисперсии этих временных рядов является значительной.

Известно, чем выше доля случайных колебаний, тем сложнее получить качественную статистическую модель. Поэтому описание с высокой точностью (более 70% от дисперсии) межгодовой изменчивости каждого из климатических индексов уже тремя квадратами в ЭАЗО показывает явно неслучайный характер влияния теплоотдачи в ЭАЗО на короткопериодные колебания климата в СА. Построенные модели GSNW, САК, $P_{им}$, АМО по данным 11 реперных квадратов, по сути, представляют собой их статистическую параметризацию и показывают, что даже по данным ограниченного набора данных о потоках тепла в ЭАЗО можно контролировать значительную долю межгодовой изменчивости климатических параметров в СА. Впрочем, пока это только предположение, которое требует более тщательной проверки в дальнейших исследованиях.

Заключение

В данной работе выполнена оценка межгодовой изменчивости суммарной теплоотдачи из океана в атмосферу для трех энергоактивных зон СА: Бермудской, Ньюфаундлендской и Норвежской за 1980-2017 гг. т.е. в период интенсивного глобального потепления. Исходными данными послужили годовые значения теплоотдачи из архива Reanalysis-2. Как и следовало ожидать, наиболее мощной является Бермудская зона, которая в 1.4 раза интенсивнее Ньюфаундлендской зоны и почти в 3 раза – Норвежской зоны. Для всех трех ЭАЗО характерен рост значений $P+LE$, соответствующий эпохе интенсивного глобального потепления. Однако для Ньюфаундлендской зоны тренд незначим по критерию Стьюдента. Максимальный коэффициент тренда отмечается в Бермудской зоне, который равен $1.1 \text{ Вт/м}^2\text{год}$, минимальный – в Ньюфаундлендской зоне ($0.5 \text{ Вт/м}^2\text{год}$). За рассматриваемый период времени теплоотдача в Бермудской зоне увеличилась на $42 \text{ Вт/м}^2\text{год}$, т.е. на 12%.

Корреляция между центрами зон является невысокой. Между Бермудской и Ньюфаундлендской зонами $r=0.37$, между Бермудской и Норвежской $r=0.44$. Полностью отсутствует корреляция между Ньюфаундлендской и Норвежской зонами. Для всех трех временных рядов свойственны малоустойчивые короткопериодные циклические колебания. В Бермудской зоне на долю случайных колебаний приходится 50% дисперсии исходного ряда, в Ньюфаундлендской – более 75%, в Норвежской – 78%. По сути это означает, что теплоотдача в ЭАЗО в значительной степени формируется случайным образом.

Установлено, что теплоотдача в ЭАЗО с высокой степенью точности описывает межгодовые колебания климатических параметров в СА – индексы Гольфстрима, атлантической мультидекадной осцилляции, североатлантического колебания и давление в центре Исландского минимума. Каждый из этих параметров с точностью примерно 70% дисперсии описывается среднегодовыми значениями суммарной теплоотдачи в трех квадратах ЭАЗО. Всего 11 квадратов в энергоактивных зонах достаточно, чтобы описать весь комплекс важнейших климатических параметров в Северной Атлантике с приемлемой для практических целей точностью. Это, по сути, позволяет контролировать

значительную долю их межгодовой изменчивости по очень ограниченному набору данных о теплоотдаче в ЭАЗО и доказывает сильное влияние энергоактивных зон океана на формирование короткопериодных колебаний климата в СА в современных условиях глобального потепления.

Список литературы

Алексеев Г.В., Николаев Ю.В., Романцов В.А. 1985. Норвежская энергоактивная зона. – Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос – программа «Разрезы». – М., ВИНТИ, т. 5, с. 45-62.

Баранов Е.И. и др. 1985. Гидрометеорологическая характеристика Ньюфаундлендской энергоактивной зоны. – Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос – программа «Разрезы». – М., ВИНТИ, т. 5, с. 63-93.

Бирман Б.А., Позднякова Т.Г. 1985. Климатические характеристики теплообмена в зонах активного взаимодействия океана и атмосферы. – М., Гидрометцентр СССР, 84 с.

Бирман Б.А., Ларин Д.А., Позднякова Т.Г. 1983. Некоторые вопросы климатологии теплообмена в энергоактивных зонах Мирового океана. – Метеорология и гидрология, № 5, с. 79-86.

Бурков В.А. 1985. Гидрометеорологический обзор энергоактивной зоны Гольфстрима. – Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос – программа «Разрезы». – М., ВИНТИ, т. 5, с. 4-44.

Гордеева С.М., Малинин В.Н. 2016. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования. – Ученые записки РГГМУ, № 44, с. 30-44.

Гордеева С.М., Малинин В.Н. 2018. О предвычислении годового стока крупных рек Европейской территории России на основе метода деревьев решений (decision trees). – Ученые записки РГГМУ, № 50, с. 53-65.

Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М. 2013. Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме. – Океанология, т. 53, № 4, с. 1-9.

Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. 1984. Аномалии радиационного баланса Земли и теплосодержания деятельного слоя океана как проявления энергоактивных зон. – Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос – программа «Разрезы». – М., ВИНТИ, 280 с.

Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. 1990. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные зоны Мирового океана. – Л., Гидрометеиздат, 336 с.

Малинин В.Н., Смирнов Н.П. 1977. К исследованию очагов теплоотдачи в Северной Атлантике. – Труды ААНИИ, т. 362, с. 58-70.

Малинин В.Н. 1986. Водный баланс атмосферы Норвежской энергоактивной зоны. – Труды ЛГМИ, вып. 93, с. 99-112.

Марчук Г.И., Скиба Ю.Н. 1976. Численный расчет сопряженной задачи для модели термического взаимодействия атмосферы с океанами и континентами. – Изв. АН СССР, ФАО, т. 12, № 5, с. 459-469.

Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие. 2012. / Под ред. Р.М. Вильфанда, А.И. Неушкина. – Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 123 с.

Тимонов В.В., Смирнова А.И., Непоп К.И. 1970. Очаги взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой. – Океанология, т. 10, № 5, с.745-749.

Bramer M. 2007. Principles of Data Mining. – London, Springer-Verlag, 344 p. Doi: 10.1007/978-1-84628-766-4.

Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. 1984. Classification and Regression Trees. –New York, Chapman and Hall, 358 p.

Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P. 2013. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. – Nature, vol. 499, No. 7459, pp. 464-467.

Gulev S.K., Latif M. 2015. The origins of a climate oscillation. – Nature, vol. 521, pp. 428-430.

Hurrell J. 2003. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Geophysical Monograph 134. American Geophysical Union. Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help / StatSoft inc. – URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/InteractiveTreesCRTCHAID_HIndex.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. 2002. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) – Bul. of the Atmos. Met. Soc., vol. 83, pp. 1631-1643.

Taylor A.H., Stephens J.A. 1980. Latitudinal displacements of the Gulf Stream and their relation to changes in temperature and zooplankton abundance in the NE Atlantic. – Oceanol. Acta, No. 3, pp. 145-149.

Статья поступила в редакцию: 23.05.2018 г.

После переработки: 03.07.2018 г.