

УДК 911.2:551.526.6

**А. В. ХОЛОПЦЕВ**, д-р геогр. наук, проф., **М. П. НИКИФОРОВА**

*Севастопольский национальный технический университет*  
ул. Университетская, 33, 99033, Севастополь, Украина  
kholoptsev@mail.ru

## **ИЗМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГОДОВЫХ ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНОСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА**

Поверхностные температуры многих акваторий Атлантического океана на протяжении периода современного потепления климата устойчиво повышались, что было вызвано снижением интенсивности его апвеллингов и увеличения потока тепла, доставляемого из Южной Атлантики северной струей Южно-Пассатного течения. В период 2002- 2011 гг. потепление Атлантики прекратилось. В последующие годы XXI века вероятно снижение ее поверхностных температур, что может привести к похолоданию климата Европы и Северной Америки.

**Ключевые слова:** Атлантический океан, среднегодовые, аномалии, поверхностные температуры, апвеллинг, Глобальный тепловой океанический конвейер, похолодание, потепление, климат

### **Холопцев А. В., Никифорова М. П. ЗМІНИ РОЗПОДІЛУ СЕРЕДНЬОРІЧНИХ ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ ПРИ СУЧАСНОМУ ПОТЕПЛІННІ КЛІМАТУ**

Поверхневі температури багатьох акваторій Атлантичного океану на протязі періоду сучасного потепління клімату стійко підвищувалися, що було викликано зниженням інтенсивності його апвелінгів та збільшення потоку тепла, що доставляється з Південної Атлантики північним струменем Південно-пасатної течії. У період 2002 - 2011 рр.. потепління Атлантики припинилося. У наступні роки XXI століття імовірно зниження її поверхневих температур, що може призвести до похолодання клімату Європи й Північної Америки.

**Ключові слова:** Атлантичний океан, аномалії, середньорічні, поверхневі температури, апвелінг, Глобальний тепловий океанічний конвеєр, похолодання, потепління, клімат

### **Holoptsev A.V., Nikiforova M. P. THE CHANGE IN DISTRIBUTION OF AVERAGE ANNUAL SURFACE TEMPERATURE ATLANTIC OCEAN UNDER MODERN CLIMATE WARMING**

Surface temperatures of many waters in the Atlantic Ocean during the period of the modern warming rising steadily, driven by a reduction of its upwellings and increase the flow of heat delivered from the South Atlantic jet northern South Equatorial Current. In the period of 2002 - 2011 years. Atlantic warming has stopped. In subsequent years, the twenty-first century, probably reducing its surface temperature, which could lead to a cooling of the climate in Europe and North America.

**Keywords:** Atlantic Ocean, anomalies, average annual, surface temperature, upwelling, global ocean heat conveyor, cooling, warming, climate

#### **Введение**

Мировой океан, занимающий 71% поверхности нашей планеты, является основным источником потоков тепловой радиации и водяного пара, поступающих в земную атмосферу, участвующих в образовании парникового эффекта и развитии ее ландшафтной оболочки. Поэтому выявление особенностей изменчивости средних температур различных его регионов, проявившихся в период современных перемен климата, является актуальной проблемой физической географии.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для акваторий, поверхности которых являются основными источниками потоков тепла и влаги, поступающих, благодаря атмосферному переносу, на территории Европы и Северной Америки и существенно влияющих на условия жизни их населения [1, 2].

Главной из акваторий является Атлантический океан, поверхность которого согревается поступающими на нее потоками солнечной радиации и обратного теплового излучения атмосферы, а также приходящими в нее из Индийского океана водами

течения Мыса Игольного. В то же время она охлаждается в результате излучения уходящей длинноволновой радиации, испарения водяного пара, а также прихода холодных течений из Арктики, Антарктики, Тихого океана и подъема холодных вод из глубин, в районах апвеллингов. Вследствие

#### *Анализ последних исследований и публикаций*

Основой современных представлений о причинах изменчивости распределения ASST Атлантического океана являются работы В. Н. Степанова [3], С. С. Лаппо [5], У. Брокера [6], В. А. Буркова [7], В. В. Шулейкина [8], Н. П. Булгакова [9], В. Ф. Суховей [10].

Ныне ведущую роль в изучении изменчивости температурного режима Индийского океана играют работы Американского геофизического союза, Объединенного института по изучению атмосферы и океана (Сиэтл, Вашингтон, США), отдела океанографии Саутгемптонского Университета (Великобритания), NASA, Калифорнийского института технологий, института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Морского гидрофизического института НАНУ. Несмотря на то, что активные исследования поля температуры Атлантики проводят ученые многих стран, современные представления о его пространственно-временной изменчивости наиболее полно и всесторонне изложены в таких работах как Э. М. Уилкоккс, Кью-Ким Мен [11], М. Руо [12], К. Дезера, А. Филлипс, М. Александров [13], Дж. Чаинг, Й. Кушнира, А. Жианини [14], Дж., З. Зхоу [15], Г. Сиедлер, Н. Зангенберг, Р. Онкен, А. Морлирье [16], О. Ву, К. Боуман [17]. Видное место в исследованиях термики Атлантического океана занимают труды таких отечественных ученых как Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Сизов А. А. [18], Артамонов Ю. В., Булгаков Н. П., Ломакин П. Д., Скрипалева Е. А., Артамонов А. Ю., Станичный С. Н. [19].

Особенности распределения ASST Атлантического океана обусловлены характером циркуляции его водных масс, благодаря которому в них существует как горизонтальный перенос тепла, так и вертикальный обмен между его водными массами [3, 10]. В восточный сектор тропической зоны Атлантики поступают с севера холодные

гигантских размеров поверхности Атлантического океана, тенденции изменчивости его средней ASST (среднегодовая температура поверхности океана) существенно влияют на изменения климата не только отдельных регионов планеты, но и ее глобального климата [3, 4].

воды Канарского течения, а с юга – Бенгельского течения. Здесь же, равно как и в приэкваториальной зоне океана, образуется апвеллинг, который обладает наибольшей интенсивностью в периоды возникновения процесса Ла-Нинья. Вследствие этих причин указанному региону Атлантики свойственны более низкие значения ASST, чем западному сектору ее тропической зоны.

По указанным причинам основным фактором, определяющим распределения ASST Атлантического океана, являются взаимодействие его поверхностного слоя с атмосферой и водами, заполняющими его глубины. На результат этого взаимодействия влияют:

- потоки солнечной радиации и обратного теплового излучения атмосферы, поглощенные поверхностями океанов;
- поверхностные океанические течения, перераспределяющие поглощенное тепло между различными районами океана, а также доставляющие его из Индийского океана в Атлантику, а также уносящие его в Северный Ледовитый океан [10];
- апвеллинги, существующие во многих прибрежных районах океана, его приэкваториальной зоны, а также у берегов Антарктиды, доставляющие на поверхность холодные и богатые биогенами воды из их глубин;

- африканские муссоны, порождающие сезонную изменчивость циркуляции вод океана, а также существенно влияющие на характеристики приэкваториальной дивергенции его поверхностных течений [3, 7].

Причинами снижения ASST экваторий рассматриваемого океана могут служить не только увеличение расходов или похолодание вод холодных поверхностных течений, поступающих в восточные сектора их тропических зон, но и активизация про-

цессов апвеллинга (прибрежного, а также экваториального) [8].

При усилении апвеллинга увеличивается расход потока холодных вод, поднимающихся из глубин океана, в также количество соединений азота и фосфора, выносимых ими в единицу времени в его поверхностный слой, что увеличивает продукцию обитающего в нем фитопланктона. Как снижение температуры поверхностного слоя вод, так и увеличение потребления его фитопланктоном  $\text{CO}_2$ , приводят к увеличению потоков этого парникового газа, удаляющих его из атмосферы в океан (что, равно как и снижение интенсивности образования водяного пара, ослабляет парниковый эффект и является дополнительным фактором похолодания).

Причинами активизации апвеллинга могут быть как усиление ветра над водной поверхностью, сгоняющего теплые поверхностные воды от побережий, либо вызывающего дивергенцию течений в приэкваториальной зоне океана, так и уменьшение плотности вод, выходящих на поверхность из его глубин.

В соответствии с гидрофизическими характеристиками, расположениями очагов формирования и глубиной залегания в Атлантическом океане принято выделять следующие четыре типа водных масс, отличающихся друг от друга своими физико-химическими свойствами: поверхностные, промежуточные, глубинные и придонные [3]. Все эти воды в той или иной мере участвуют в формировании вод, выходящих на поверхность океана в районах апвеллингов. Как результат, все они оказывают некоторое влияние на формирование распределения их ASST. Существенное влияние на этот процесс оказывают также изменения характеристик крупномасштабных океанических течений, переносящих поверхностные воды.

Указанные воды Атлантического океана формируются при непосредственном обмене энергией и веществами его поверхностного слоя с атмосферой. Вследствие этого их характеристикам присуща ярко выраженная сезонная изменчивость [10].

У берегов Антарктиды формируются т. н. поверхностные южные полярные воды

Атлантики, отличающиеся крайне низкими температурами и низкой соленостью. Зимой в южных частях Антарктики температура воды на поверхности снижается примерно до  $-2^\circ\text{C}$ , а на севере – около  $0^\circ\text{C}$  или несколько выше. Летом самый верхний слой воды в некоторых местах прогревается только до  $+2 - +3^\circ\text{C}$ . Толщина рассматриваемого относительно холодного поверхностного слоя воды здесь колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен метров [25].

На распределение ASST Атлантики существенно влияют также холодные и опресненные, поверхностные арктические воды, поступающие из Северного Ледовитого океана двумя мощными потоками эти. Один из них – Восточно-Гренландское течение, проходит через Датский пролив, вдоль восточного берега Гренландии, и огибая этот остров с юга, частично уходит к его западным берегам, и далее в море Баффина, образуя Западно-Гренландское течение.

Второй поток поверхностных арктических вод, приходящих в Северную Атлантику, – Лабрадорское течение, которое образуется в море Баффина при слиянии вод, выходящих из Арктики, через пролив между Гренландией и островом Земля Эймери, а также приносимых Западно-Гренландским течением. Лабрадорское течение огибает полуостров Лабрадор, остров Ньюфаундленд и проникает по поверхности, вдоль побережья Северной Америки, на юг, до мыса Хаттерас, оттесняя к востоку Гольфстрим [7].

В Атлантическом океане выделяют четыре типа промежуточных водных масс. Наибольшее влияние на изменения распределения поверхностных температур океана оказывают субарктические и субантарктические водные массы образованы, обладающими относительно пониженной соленостью.

Особенно широкое распространение в Атлантике океане получила промежуточная субантарктическая водная масса пониженной солености, которая прослеживается от субантарктического фронта ( $45-60^\circ\text{S}$ ) примерно до  $20^\circ\text{N}$  и принимает участие в образовании его экваториального и многих при-

брежных апвеллингов. Она образуется при опускании поверхностных южных полярных вод в субантарктической области, которое усиливается нисходящими движениями, возбуждаемыми южными антициклоническими макроциркуляционными системами. В этом процессе участвуют и глубинные воды, поднимающиеся в области антарктической дивергенции. У субантарктического фронта вертикальные составляющие движения особенно интенсивны зимой, в результате усиления конвекции, вследствие чего изогалины и изотермы располагаются почти вертикально, горизонтальные градиенты плотности максимальны.

По указанной причине важнейшим очагом интенсивного образования промежуточных вод Атлантического океана является обширная зона антарктического шельфа и материкового склона. Здесь в осенне-зимний период развивается интенсивная соленостная конвекция, приводящая к увеличению их плотности. Летом тут же происходит трансформация потоков опресненных вод, поступающих из-под шельфовых ледников Антарктиды, а также образующихся при таянии айсбергов. Это приводит к уменьшению плотности образующихся в это время промежуточных вод Антарктики.

Характеристики соленостной конвекции и интенсивность образования талых вод существенно зависят от температуры вод поверхностного слоя акваторий, в которых происходят эти процессы. Поэтому изменения ASST акваторий Антарктики ощутимо влияют на плотность образующихся в них антарктических промежуточных вод. При их повышении количество трансформированной пресной воды, поступающей в промежуточную, а также придонную водную массу Атлантики возрастает, а интенсивность зимней соленостной конвекции уменьшается. Это приводит к формированию перечисленных вод, обладающих пониженной плотностью, распространяющихся ближе к поверхности океана [3, 25]. При снижении ASST акваторий Антарктики соленость и плотность образующихся в них вод также возрастает.

В результате, при потеплении климата Антарктики, в ней образуются промежуточные воды с меньшими значениями соле-

ности и плотности, участвующие спустя некоторое время в процессах апвеллинга. В периоды его похолодания значения тех же характеристик данных вод становятся больше.

По оценкам У. Брокера [6] средняя скорость движения Глобального теплового океанического конвейера 0,3 см/с (или приблизительно 90 км/год). Приблизительно с такой же скоростью движутся к экватору в толще Атлантического океана и промежуточные субантарктические воды. При этом в его районы апвеллинга они поступают спустя многие десятилетия, что приводит к увеличению, либо уменьшению расхода водных потоков, выходящих здесь на поверхность Атлантики, и соответствующим изменениям распределения ее ASST.

Времена распространения рассматриваемых вод в различные районы Атлантики, где происходит апвеллинг, пропорциональны расстояниям до них от субантарктической зоны конвергенции. Поэтому время их распространения в тот или иной район тем меньше, чем меньше соответствующее расстояние.

Как следует из изложенного, колебания ASST акваторий Антарктики приводят к возникновению пространственной модуляции солености и плотности образующихся в них субантарктических промежуточных вод. В периоды, когда более плотные промежуточные воды подходят в некий район апвеллинга, расход водного потока, поступающего из глубин океана на его поверхность, при неизменной скорости ветра, уменьшается. Если в апвеллинге участвуют менее плотные промежуточные воды, расход этого потока в тех же условиях увеличивается.

Изменения расходов поступающих в поверхностные слои районов апвеллинга Атлантического океана, потоков холодных промежуточных субантарктических вод, вызывают соответствующие вариации их ASST. Тем самым они способны влиять на особенности проявления здесь процесса Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). При их увеличении формируются условия, наблюдаемые при образовании его фазы Ла-Нинья, а при снижении – Эль-Ниньо.

Субарктическая промежуточная водная масса Атлантики по условиям формирования, свойствам и особенностям распространения весьма близка к субантарктической. Она также образуется в зоне субполярного фронта, однако сразу же за субарктическим фронтом попадает в область интенсивно опускающихся высокосоленных вод, быстро трансформируется и теряется. Тем не менее, изменения ее солёности и плотности ощутимо влияют на расход водного потока, поднимающегося из глубин Атлантики на ее поверхность в районе Канарского апвеллинга.

В периоды, когда плотность этих вод, сформировавшихся в периоды потепления в Арктике и снижения солёности вод Лабрадорского и Восточно-Гренландского течений, уменьшается, расход их потока, поступающего на поверхность соответствующих акваторий Атлантики, увеличивается, что вызывает снижение их ASST. Повышение ASST тех же акваторий является откликом на похолодание в Арктике, вызывающее повышение солёности и плотности вод, доставляемых в Атлантику упомянутыми течениями и поступивших на субарктическом фронте в ее субарктическую промежуточную водную массу.

Благодаря тому, что результаты реанализа зависимостей от времени аномалий, усредненных по квадратам  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  среднеме-

сячных значений поверхностных температур большинства акваторий Атлантики [26, 27], представлены в свободном доступе в Интернете, подобная информация ныне все шире используется в физико-географических исследованиях. В частности, она позволяет исследовать изменения средних ASST многих ее регионов. Тем не менее, современные тенденции изменчивости распределения ASST акваторий всей Атлантики изучены недостаточно, что не позволяет их адекватно учитывать при моделировании и прогнозировании изменений в ближайшие десятилетия характеристик многих глобальных и региональных процессов в физико-географической оболочке нашей планеты. Учитывая это, выявление подобных тенденций, проявившихся в период современного потепления климата, представляет существенный теоретический и практический интерес.

Последнее обусловило выбор в качестве объекта данного исследования, изменений распределений ASST Атлантического океана. Предметом исследования являлись тенденции изменения распределения ASST Атлантического океана, проявившиеся при современном потеплении климата. Целью работы являлось выявление вероятных тенденций изменчивости распределения ASST Атлантического океана в XXI в.

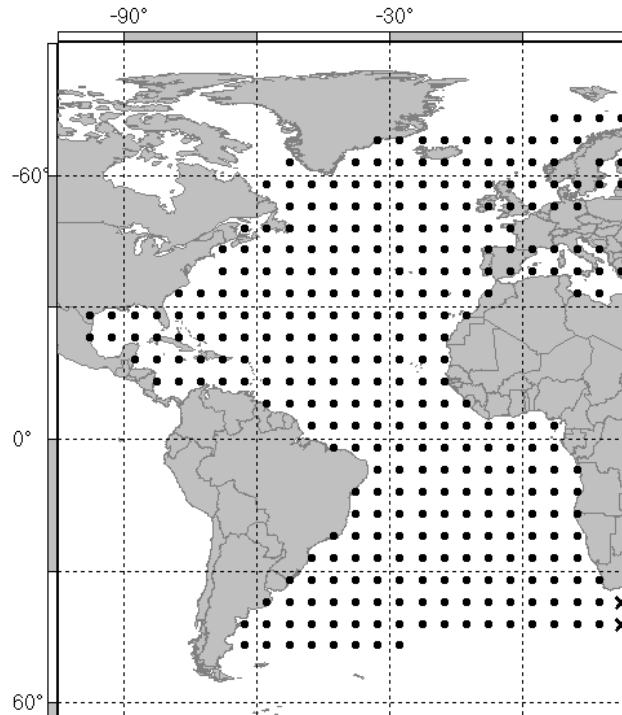
#### **Фактический материал и методика исследования**

В качестве фактического материала использованы результаты реанализа изменчивости ASST Мирового океана, усредненные по квадратам  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ , которые представлены в [26]. Учитывая предмет данного исследования, рассматривались входящие в их состав временные ряды аномалий среднемесячных значений поверхностных температур многих акваторий Атлантического океана, за период с января 1975 по декабрь 2011 гг., с помощью которых для каждого года были рассчитаны соответствующие ряды ASST.

Расположение центров акваторий Атлантического океана, для которых рассматриваемые временные ряды аномалий ASST могут быть получены из [26], показано точками на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что практически для всех акваторий Атлантического океана, расположенных в зонах, имеющих ширину  $5^{\circ}$  и расположенных между параллелями  $30^{\circ}N$  и  $50^{\circ}S$ , из [26] могут быть получены временные ряды аномалий ASST, не содержащие в период 1975 по 2011 г. существенных пропусков и пригодные для исследований. Поэтому фактический материал, используемый при проведении исследований, может рассматриваться как репрезентативный.

Как количественная мера тенденции изучаемого процесса рассматривалось рассчитанное, согласно [28], в скользящем окне продолжительностью 10 лет, значение углового коэффициента линейного тренда его временного ряда.



**Рис. 1** – Расположение центров акваторий Атлантического океана, для которых из [26] были получены временные ряды ASST

Для определения значения этой меры, соответствующего любому квадрату Атлантики, использовались описанные выше результаты реанализа. Поскольку количество судов, где производились измерения в том или ином месяце, в разных квадратах Атлантики различаются, полученные при этом результаты не являются равнозначными, что может быть причиной некоторых погрешностей.

Для оценки уровней этих погрешностей, по данным реанализа рассчитаны значения средней ASST Северной Атлантики, за период 1975 – 2011 гг., по которым вычислены значения оценок рассматриваемой меры. Аналогичные расчеты произведены, с использованием в качестве исходных данных временного ряда среднегодовых значений индекса Атлантического Мультидекадного колебания (AMO – Atlantic multidecadal Oscillation [29]), полученного из [30], который также характеризует изменение средней ASST всей Северной Атлантики и принимался за действительное значение этой величины.

Полученные таким образом зависимости от года начала десятилетнего окна каждого упомянутого временного ряда, значе-

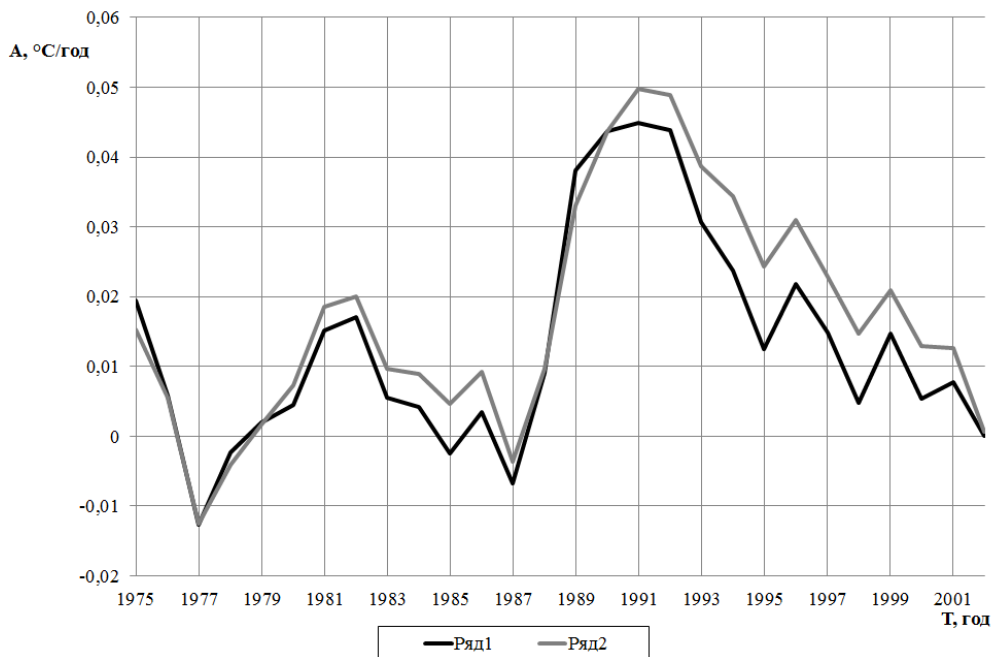
ний углового коэффициента его линейного тренда приведены на рис. 2.

Как видно из рисунка 2, в период с 1975 по 2011 гг. в Северной Атлантике преобладали тенденции к повышению ее средней ASST, при этом средняя скорость изменения этой характеристики в период с 2002 по 2011 гг. снизилась до 0 (т. е. потепление в указанный период прекратилось).

Из сравнения зависимостей, представленных на рисунке 2, также следует, что максимальное значение отклонения оценок средних ASST Северной Атлантики, полученных по указанным исходным данным, не превышает  $0.011^{\circ}\text{C}/\text{год}$  (для окна с 1995 по 2004 гг.). Расчет показал, что систематическая погрешность оценок, полученных с использованием данных реанализа, составляет  $0.0039^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , а их абсолютная погрешность равна  $0.0042^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . Столь малые значения погрешностей свидетельствуют о том, что результаты, полученные по данным реанализа, являются адекватными.

Учитывая это, для достижения указанной цели, с использованием данных реанализа, решены следующие задачи:

1) Анализ изменчивости тенденций вариаций ASST всей поверхности Атлантического океана в период с 1975 г. по 2011 г.



**Рис. 2** – Зависимости от года начала десятилетнего окна, для которого производился расчет, значений угловых коэффициентов линейных трендов временных рядов средних ASST Северной Атлантики, оцененных по данным реанализа (ряд 1), а также по значениям индекса АМО (ряд 2)

2) Сопоставление распределений по поверхности Атлантического океана значений углового коэффициента линейного тренда его ASST, рассчитанных для различных десятилетних интервалов времени, в период современного потепления климата.

При решении первой задачи предполагалось, что для акваторий Атлантического океана, по которым данные о значениях ASST из [26] не могут быть получены, эти значения принимались равными средним ASST в том же году, рассчитанным по всем его акваториям, расположенным в соответствующих зонах шириной 5°. Это позволило по результатам реанализа изменений ASST всех акваторий Атлантического океана, с учетом зависимости площади акватории размерами 5°x5° градусов, от географической широты ее центра ( $\phi_i$ ) рассчитать средние значения этой характеристики (ASST) для каждого года в период с 1975 г. по 2011 г. ASST вычислялось как:

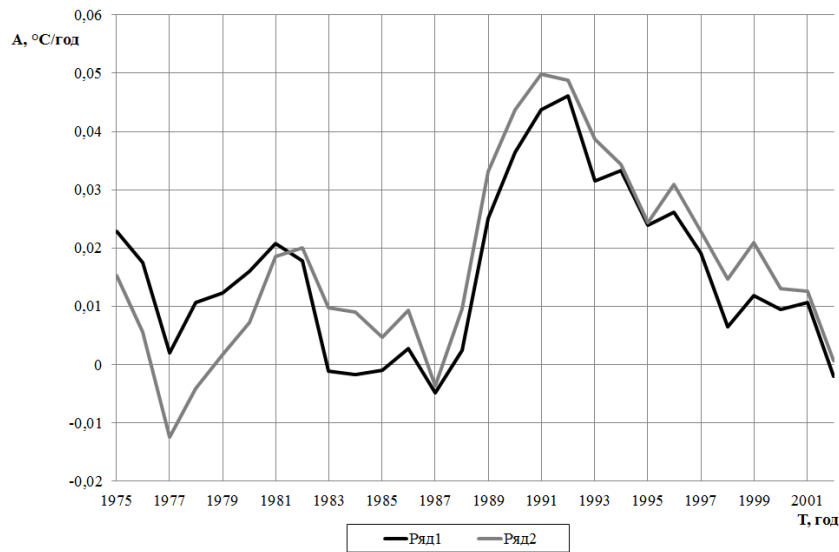
$$\sum_{i=1}^{24} \left( \frac{\alpha \sigma \tau \phi_i \cdot L \phi_i}{5} \right) \cdot \cos \phi_i / \sum_{i=1}^{24} \frac{L \phi_i}{5} \cdot \cos \phi_i , \quad (1)$$

где:  $L \phi_i$  – фактическая ширина (в угловых градусах) Атлантического океана по параллели, соответствующей широте  $\phi_i$ ;

$\alpha \sigma \tau(\phi_i)$  – среднее значение ASST всех акваторий Атлантического океана размерами 5°x5° с центрами на параллели, соответствующей широте  $\phi_i$ , рассчитанное по всем имеющимся данным реанализа [26];

Расчеты проводились, учитывая географическое положение акваторий Атлантического океана, для которых значения  $\phi_i$  последовательно задавались равными: 67,5°N, 62,5°N, ...52,5°S. Полученные при этом временные ряды использованы для расчета рассматриваемых количественных мер тенденций изучаемого процесса.

При решении второй задачи сопоставляемые распределения отображались с использованием метода триангуляции Делоне [31]. Отображались изолинии значений углового коэффициента линейного тренда, на которых этот параметр принимал значения 0, -0,02°С/год, -0,04°С/год.



**Рис. 3** – Зависимость угловых коэффициентов линейных трендов временных рядов ASST всего Атлантического океана (ряд 1), а также Северной Атлантики (ряд 2) от года начала скользящего окна продолжительностью 10 лет, по которому они вычислены

### Результаты и их анализ

Зависимость угловых коэффициентов линейных трендов временных рядов ASST всего Атлантического океана, а также одной лишь Северной Атлантики от года начала скользящего окна продолжительностью 10 лет, по которому они вычислены, приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что в период с 1975 г. по 2011 г. в изменениях ASST всего Атлантического океана преобладали тенденции к потеплению, которые на интервалах 1992 – 2001 гг. ... 2001 – 2010 гг. постепенно слабели, а в период 2002 – 2011 гг. сменились на противоположные (к похолоданию). В Северной Атлантике потепление поверхности продолжалось и в период с 2002 г. по 2001 г., однако значение углового коэффициента линейного тренда ASST не превышало среднеквадратической погрешности его вычисления, т. е. значимым уже не являлось. Из обеих зависимостей, представленных на рис. 3, следует, что в ближайшие годы вероятным является возникновение устойчивых тенденций к похолоданию как всей поверхности Атлантики, так и одной ее северной части.

Учитывая влияние изменений ASST Атлантики на термические условия в регионах Европы, данный результат позволяет прогнозировать снижение в них среднего-

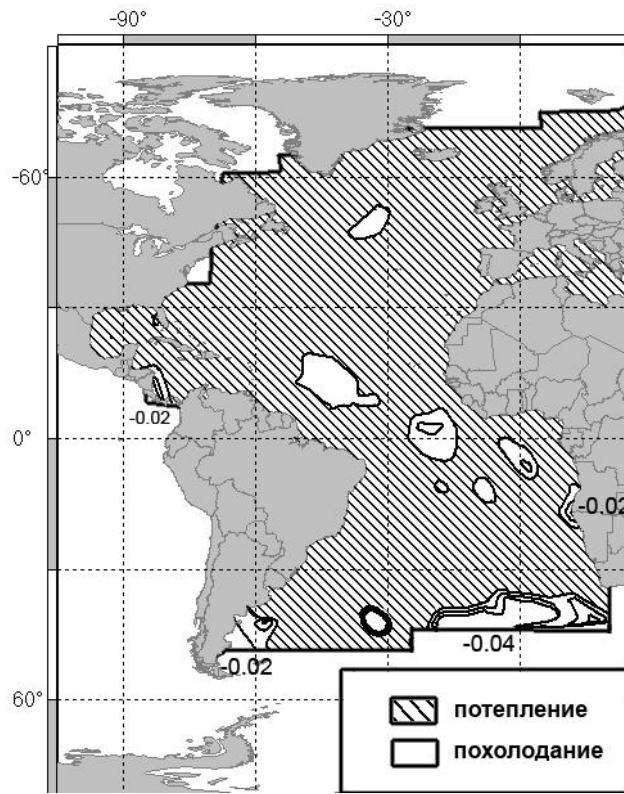
довых температур уже в ближайший год. Зима 2013 г. в Украине уже может оказаться холодней, чем в предыдущие годы.

На рис. 4 представлены распределения по поверхности Атлантического океана акваторий, в которых на отрезках времени 1994 – 2003 гг. и с 2002 – 2011 гг. преобладали те или иные тенденции изменения их ASST.

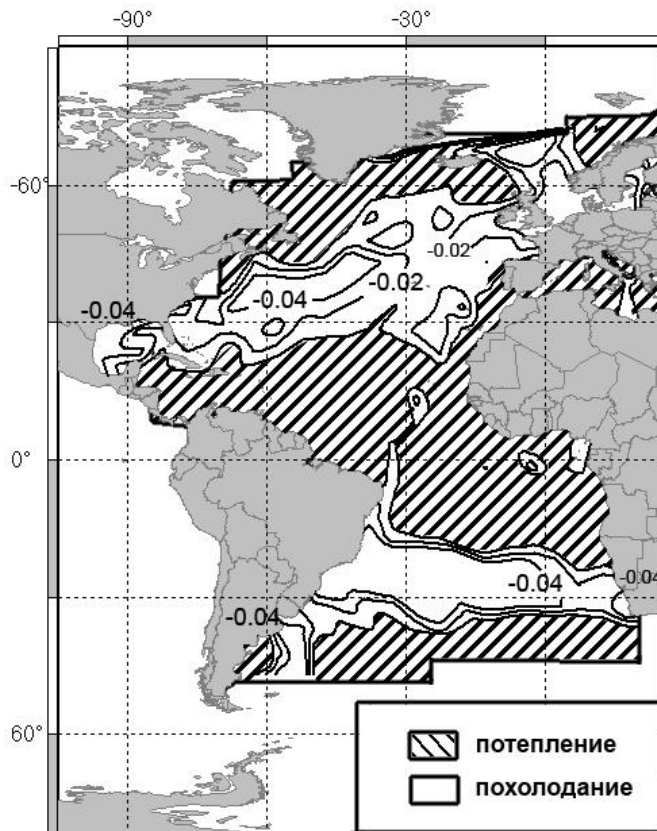
Как видно из рис. 4А, в период 1994 – 2003 гг. на преобладающей части поверхности Атлантики происходило повышение ASST. Незначительное похолодание отмечалось лишь в некоторых районах зоны экваториального апвеллинга, а также в зоне течения Западных ветров. Из рис. 4Б видно, что в период 2002 – 2011 гг. похолодание в основном происходило в огромном регионе Северной Атлантики, расположенном к югу от зоны Североатлантического течения, а также в зоне течения Западных ветров. Небольшие области похолодания располагались и в приэкваториальной зоне.

Причиной уменьшения ASST в указанном регионе Северной Атлантики явилось снижение солёности и плотности, а также увеличение среднегодовых расходов Лабрадорского и Восточно-Гренландского течений, что привело к увеличению объёмов их холодных вод, выходящих на поверх



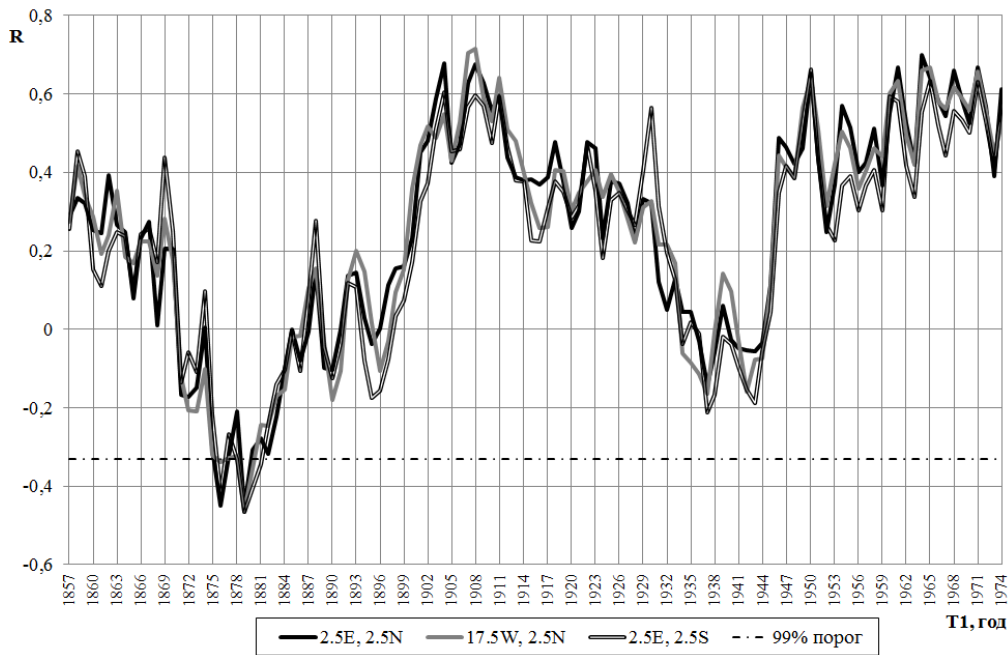


А)



Б)

**Рис. 4** – Распределения по поверхности Атлантического океана акваторий, в которых на отрезках времени 1994 – 2003 гг. (А) и с 2002 – 2011 гг. (Б) происходило повышение и понижение их ASST



**Рис. 5** – Зависимости от года начала фрагмента временного ряда средних значений ASST Южного полушария Земли длиной 36 лет коэффициента его корреляции с изменениями в период 1975 – 2011 гг. ASST акваторий Атлантического океана, с координатами центров (2,5°E, 2,5°N), (17,5°W, 2,5°N) и (2,5°E, 2,5°S)

ность к югу от Североатлантического течения.

Снижение ASST в зоне течения Западных ветров, по-видимому, является следствием увеличения потока опресненных поверхностных южных полярных атлантических вод, поступающих в эту зону с Фолклендским течением, а также непосредственно из моря Уэдделла. Определенное влияние могла оказывать также активизация южно-атлантических апвеллингов.

Области похолодания, расположенные на поверхности приэкваториальной зоны Атлантики, соответствуют районам ее экваториального апвеллинга. Причиной снижения их ASST, по-видимому, является уменьшение солености и плотности поднимающихся в них вод из глубин Атлантики, сформировавшихся с участием дошедших до экватора компонентов ее промежуточной субантарктической водной массы.

Для подтверждения адекватности данного предположения, а также оценки времени запаздывания подобной реакции распределения ASST Атлантики на изменения ASST акваторий Антарктики, являющихся очагами формирования данной массы, применен метод корреляционного анализа.

Полученные при этом зависимости от года начала окна временного ряда ASST акваторий Антарктики, длиной 37 лет коэффициента их корреляции с временными рядами ASST акваторий Атлантики, центры которых имеют координаты: 2,5°E, 2,5°N, 17,5°W, 2,5°N и 2,5°E, 2,5°S приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что вывод о наличии значимой статистической связи между изменениями в период 1975 – 2011 гг. ASST акваторий Атлантического океана с координатами центров 2,5°E, 2,5°N, 17,5°W, 2,5°N и 2,5°E, 2,5°S, а также вариациями средних значений ASST Южного полушария, опережающими их приблизительно на 100 лет, характеризуется достоверностью, оцененной по критерию Стьюдента, не ниже 0,99 [32].

Как известно, изменения ASST акваторий Антарктики, где формируются промежуточные субантарктические воды Атлантики, в значительной мере следуют за изменениями средних значений ASST Южного полушария. Поэтому из данного результата следует допустимость связывать изменения ASST акваторий приэкваториальной зоны Атлантического океана,

происходившие в период 1975 – 2011 гг., с опережающими их на 100 лет, вариациями ASST акваторий, расположенных в зоне субантарктического фронта. Седовательно, для построения прогноза тенденций изменчивости ASST акваторий экваториального апвеллинга и южной части Атлантического океана на ближайшие века может быть использована зависимость от времени ASST Южного полушария Земли в период с 1856 г. по 2009 г., приведенная на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что причиной повышения ASST районов апвеллинга Южной и приэкваториальной Атлантики, в период с 1979 по 2011 гг. могло являться похолодание в Антарктике, пришедшее на 1879-1911 гг. Поскольку в период с 1912 по 2011 гг. средние значения ASST Южного полушария Земли устойчиво повышались, рассмотренные закономерности позволяют предполагать, что в период с 2012 по 2111

гг. ASST Южной и приэкваториальной Атлантики будут устойчиво снижаться, в 2112 – 2211 гг. – устойчиво возрастать. В последующие годы XXI в. к числу основных причин снижения ASST Атлантики, вероятно, будет относиться значительное увеличение размеров акватории ее приэкваториальной зоны, в которой происходит похолодание, вызванное снижением плотности влияющих на интенсивность апвеллинга, промежуточных вод, сформировавшихся в Антарктике в XX в.

Благодаря действию Глобального теплового океанического конвейера, похолодание в указанных регионах Атлантики спустя некоторое время усилит похолодание и в ее северной части. К тому же будет сказываться снижение температуры вод, доставляемых в Южную Атлантику из Индийского океана течением мыса Игольный, а также поднимающихся к поверхности в

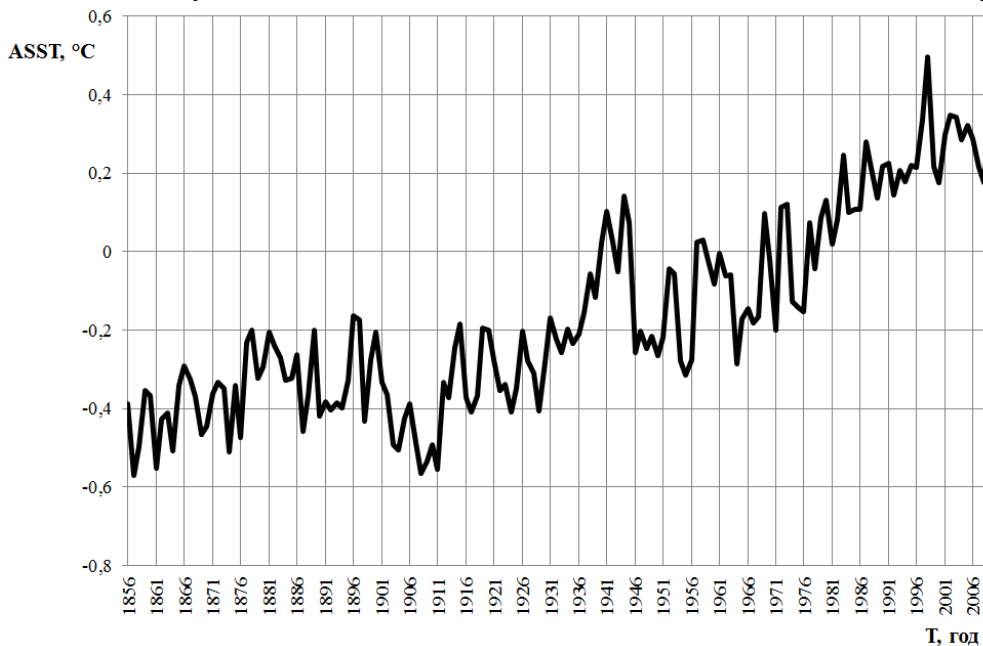


Рис. 6 – Зависимость от времени средних значений ASST Южного полушария Земли в период с 1856 г. по 2009 г., построенная по данным [33]

зоне экваториального апвеллинга. Еще одним фактором уменьшения ASST Северной Атлантики океана может быть активизация Канарского апвеллинга, вызванная ускоренным таянием покровных ледников Гренландии, снижением солености и увеличением расхода Восточно-Гренландского и Лабрадорского течений, приносящих в Ат-

лантику холодные воды из Северного Ледовитого океана.

Как известно, происходящее в XX – XXI в. увеличение содержания в атмосфере парниковых газов приводит к возрастанию доли суммарного потока уходящей длинноволновой радиации, которая возвращается к подстилающей поверхности в виде ее обратного теплового излучения и участвует в образовании парникового эффекта. Вслед-

ствие этого, представляется вероятным, что средние скорости изменения ASST Атлантики в периоды с 2012 по 2111 гг. и с 2112 – 2211 гг. по модулю будут соответственно меньше и больше, чем средняя скорость повышения ASST Антарктики с 1912 по 2011 гг.

Выявленные закономерности позволяют предполагать, что происходившие ранее и прогнозируемые на XXI – XXII вв. изменения ASST Атлантики являются реги-

ональными проявлениями 200 летнего цикла изменчивости глобального климата, выявленного А.В. Шнитниковым. Его существование обусловлено рассмотренными выше особенностями взаимодействия Антарктики и приэкваториальных зон Мирового океана. Аналогичные и синхронные проявления этого цикла (похолодание в приэкваториальной зоне) возможны в Тихом и Индийском океанах.

### Выводы

Устойчивый рост средних значений ASST всей акватории Атлантического океана, а также одной его северной части, продолжавшийся с 1975 по 2011 гг., в период с 2002 по 2011 гг. практически прекратился. В районах всех главных апвеллингов Атлантики, кроме экваториального, в указанный период происходило похолодание поверхности океана, которое было вызвано их активизацией.

Основной причиной похолодания в районах южноатлантических апвеллингов послужило потепление климата Антарктики, происходившее в конце XIX века, которое вызвало увеличение потока пресных талых вод, участвующих в формировании антарктических промежуточных вод Атлантического океана. Похолодание в районе Канарского апвеллинга является следствием увеличения расхода и уменьшения солености вод, приносимых Восточно-Гренландским и Лабрадорским течениями, приносящими в Атлантику холодные воды из Северного Ледовитого океана.

Учитывая продолжительности периодов, за которые эти воды распространились

от очагов их образования до соответствующих районов Атлантики, представляется вероятным, что в оставшиеся десятилетия XXI в. будет происходить снижение ASST всей ее акватории, в котором немалую роль сыграет активизация экваториального апвеллинга. После 2211 г. следует ожидать очередной волны ее потепления.

Происходившие и прогнозируемые изменения ASST Атлантики являются проявлениями здесь 200-летнего цикла изменчивости глобального климата, обусловленного взаимодействием Антарктики и приэкваториальных зон Мирового океана.

Похолодание поверхностных вод Атлантического океана и его северной части, несмотря на продолжающееся увеличение содержания в атмосфере парниковых газов, противодействующее похолоданию глобального климата, может вызвать в XXI в. некоторое снижение, а в XXII в. очередное и более осязаемое, чем в XX в., повышение среднегодовых температур воздуха в Европе и Северной Америке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Salby M. L. Fundamentals of Atmospheric Physics / M. L. Salby. – New York: Academic Press, 1996. – 560 p.
2. Школьный Є. П. Фізика атмосфери / Є. П. Школьний. – Одеса, 1997. – 698 с.
3. Степанов В. Н. Океаносфера. / В. Н. Степанов. – М.: Мысль, 1983. – 270 с.
4. Перрен Ж. Океаны / Ж. Перрен, Ж. Клуазо. – Пер. с фр. – М.: Летний сад, 2011. – 320 с.
5. Лаппо С. С. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан – атмосфера и

энергоактивные области мирового океана / С. С. Лаппо, С. К. Гулев, А. Е. Рождественский. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 334 с.

6. Бурков В. А. Общая циркуляция Мирового океана. / В. А. Бурков. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 254 с.

7. Broecker W. S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1991. V.1. P.79-89.

8. Шулейкин В. В. Физика моря / В. В. Шулейкин. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.

9. Булгаков Н. П. Структура и крупномасштабная изменчивость поля плотности в бассейне Карибского моря./ Н. П. Булгаков, П. Д. Ломакин, В. А. Рыбалка – Севастополь: МГИ АН УССР, 1988.
10. Сухой В. Ф. Особенности циркуляции вод в регионе между Африкой и Антарктидой / В.Ф. Сухой, И.Г. Рубан. // Укр.гидромет.ж-л. – 2007, №2. – 186 – 194 сс.
11. Wilcox, E. M., K. M. Lau, and K.-M. Kim (2010), A northward shift of the North Atlantic Ocean Intertropical Convergence Zone in response to summertime Saharan dust outbreaks, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L04804, doi:10.1029/2009GL041774.
12. Reason, C. J. C. and M. Rouault (2006), Sea surface temperature variability in the tropical southeast Atlantic Ocean and West African rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21705, doi:10.1029/2006GL027145.
13. Deser, C., A. S. Phillips, and M. A. Alexander (2010), Twentieth century tropical sea surface temperature trends revisited, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10701, doi:10.1029/2010GL043321.
14. Chiang, J. C. H., Y. Kushnir, and A. Giannini (2002), Deconstructing Atlantic Intertropical Convergence Zone variability: Influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific, *J. Geophys. Res.*, 107(D1), 4004, doi:10.1029/2000JD000307.
15. Carton, J. A. and Z. Zhou (1997), Annual cycle of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 102(C13), 27,813–27,824, doi:10.1029/97JC02197.
16. Siedler, G., N. Zangenberg, R. Onken, and A. Morlière (1992), Seasonal changes in the tropical Atlantic circulation: Observation and simulation of the Guinea Dome, *J. Geophys. Res.*, 97(C1), 703–715, doi:10.1029/91JC02501.
17. Wu, Q. and K. P. Bowman (2007), Multiyear satellite observations of the atmospheric response to Atlantic tropical instability waves, *J. Geophys. Res.*, 112, D19104, doi:10.1029/2007JD008627.
18. Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Сизов А. А. Поле температуры поверхности Атлантики и его ритмодинамики на межгодовых масштабах/ Доповіді Національної академії наук України.- 2010.-№8.- с. 124-130.
19. Артамонов Ю. В. Поверхностные термические фронты южной части Атлантического океана и их сезонная изменчивость по данным спутниковых наблюдений/ Ю. В. Артамонов, Н. П. Булгаков, П. Д. Ломакин, Е. А. Скрипалева, А. Ю. Артамонов, С. Н. Станичний // Український Антарктичний журнал.-2004.-№2,5-14.- с.5- 14
20. <http://www.jpl.nasa.gov/>
21. <http://podaac.jpl.nasa.gov/OceanEvents>
22. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
23. <http://www.southampton.ac.uk/oes>
24. <http://noc.ac.uk/>
25. Гусев А. М. Антарктида. Океан и атмосфера. — М.: Просвещение, 1983. — 151 с.
26. <http://wxweb.meteostar.com/SST/index.shtml?point=730>
27. <http://www.reanalyses.org/ocean>
28. Айвазян С.А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Юнити, 1998, 1022 стр.
29. Enfield, D.B., A. M. Mestas-Nunez and P.J. Trimble, 2001: The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.. *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, P. 2077-2080.
30. <http://www.cdc.noaa.gov/Timeseries/AMO/>
31. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2002. – 128 с.
32. Закс Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс. Пер. с англ. Е.В. Чепурина; под ред. Беляева Ю.К. – М.: Мир, 1985. – 776 с.
33. <http://www.dss.ukar.edu>

Надійшла до редколегії 14.11.2012