

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СОБЫТИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ИХ ТИПОВ В МОДЕЛИ GFDL CM2.1

*Н.В. Михайлова, Е.Н. Воскресенская,
Е.В. Губанова**

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: Nataly.Mikhailova@mail.ru
*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et
Océanographie Spatiale, CNES/CNRS/IRD
18, av. Edouard Belin, 31401,
Toulouse cédex 9, France

По данным о температуре поверхности океана и приземном атмосферном давлении из модели GFDL (500 лет, доиндустриальный сценарий) рассчитаны индексы Эль-Ниньо и Южного Колебания и проведен сравнительный анализ с натурными данными. По модельным данным выполнена классификация событий Эль-Ниньо, описаны основные особенности воспроизведения моделью GFDL событий Эль-Ниньо разных типов.

Введение. Для диагноза и прогноза состояния системы океан-атмосфера широко используются глобальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана. Совместная модель океана и атмосферы, разработанная в Геофизической лаборатории динамики жидкости Национальной администрации атмосферы и океана США (модель GFDL) позволяет реалистично воспроизводить события Эль-Ниньо [1, 2], а также их некоторые типы [3]. При этом более тщательный анализ полученных рядов модельных данных, продолжительность которых достигает 500 лет, дает возможность уточнения классификацию событий Эль-Ниньо и продвинуться в понимании физического механизма событий Эль-Ниньо разных типов и их дальних связей.

Данные. В работе использовались ежемесячные данные о температуре поверхности океана (ТПО) и приземном атмосферном давлении, полученные в результате 500-летнего контрольного эксперимента по модели GFDL CM2.1 для сценария «доиндустриальный». Подробное описание модели представлено в работе Делворта и др. [4] Атмо-

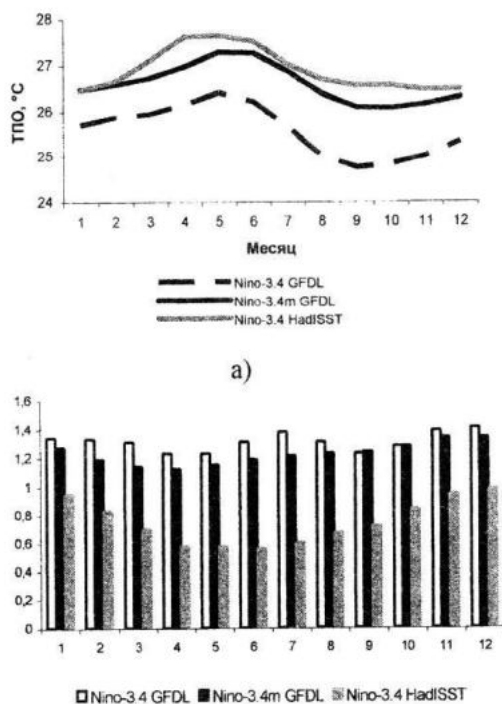
сферная модель AM2p13 имеет разрешение по пространству $2^\circ \times 2,5^\circ$ и 24 уровня по вертикали. Океанический блок представлен моделью океана версии 3.1, основанной на MOM4 (Modular Ocean Model, version 4). Эта модель имеет 50 уровней по вертикали; шаг по пространству в высоких и умеренных широтах составляет 1° , а в приэкваториальных районах уменьшается до $1/3^\circ$. Термин «доиндустриальный» сценарий означает, что использовались фиксированные значения состава атмосферы, распределения суши и прихода солнечной радиации, соответствующие 1860 г.

Для сравнения с модельными данными использовались глобальный массив по ТПО HadISST центра Гадлея (Великобритания) на сетке $5^\circ \times 5^\circ$ за 1870 – 2009 гг. [5] и индекс Южного Колебания за 1876 – 2009 гг. Метеорологического Бюро Австралии (www.bom.gov.au).

Результаты. Индекс Эль-Ниньо. Событие Эль-Ниньо (ЭН) чаще всего идентифицируется на основании индекса Эль-Ниньо, который представляет собой аномалию ТПО в центральном районе Тихого океана, называемом Nino-3.4 (5° ю.ш. – 5° с.ш., 170° з.д. – 120° з.д.) [6]. Когда эта аномалия превышает некоторую пороговую величину и наблюдается на протяжении 4-5 месяцев, то считается, что развивается событие Эль-Ниньо. Выбор порогового значения непосредственно зависит от величины среднеквадратического отклонения ряда ТПО в районе Nino-3.4 [6].

Графики среднего многолетнего годового хода температуры поверхности океана и ее среднеквадратического отклонения в районе Nino-3.4, построенные по историческим данным HadISST и модельным расчетам GFDL, представлены на рис. 1. По сравнению с натурными данными модель занижает средние месячные величины ТПО в районе Nino-3.4 на $1-2^\circ\text{C}$.

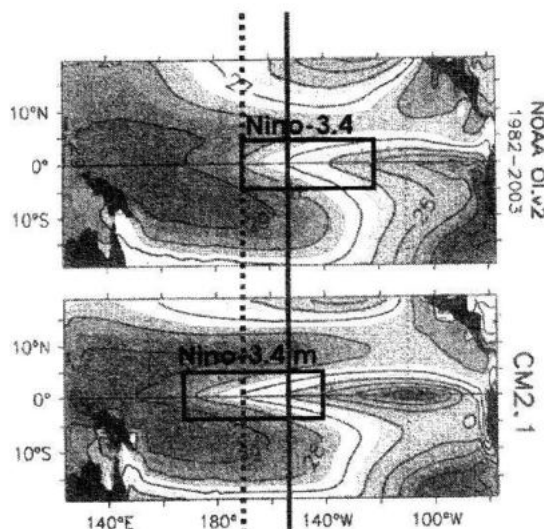
Действительно, по сведениям ряда исследователей [2, 3 и др.], модель GFDL имеет ряд недостатков, из-за которых зона относительно низких ТПО в экваториальной зоне Тихого океана (так называемый «холодный язык») распространяется дальше на запад, чем это следует из данных наблюдений (рис. 2).



Р и с. 1. Средний многолетний годовой ход температуры поверхности океана (а) и среднеквадратического отклонения ТПО (б) в районе Nino-3.4 по данным GFDL и HadISST

Учитывая указанную особенность модели GFDL, Куг и др. [3] для более корректной идентификации событий Эль-Ниньо предложили вместо Nino-3.4 использовать район Nino-3.4m (5° ю.ш. – 5° с.ш., 170° в.д. – 140° з.д.), который расположен на 20° к западу от района Nino-3.4. Как показывает рис. 1а, различия многолетних модельных среднемесячных температур (район Nino-3.4 m) и данных HadISST за исключением апреля не превышают 0,5 °С.

Межгодовая изменчивость ТПО по модельным данным, приведенная на рис. 1б, выше, чем по данным наблюдений, особенно в теплую половину года. Подобный результат показан ранее в работе Виттенберга с соавторами [2]. Это может быть связано как с недостатками модели GFDL, так и с различием в длине анализируемых рядов. Следует, в частности, отметить, что чем более низкочастотными являются колебания, тем выше их амплитуда. Если в океане существуют колебания с масштабом от 100 и до 500 лет, то модельный ряд длиной 500 лет включает от 1 до 5 волн, а натурные



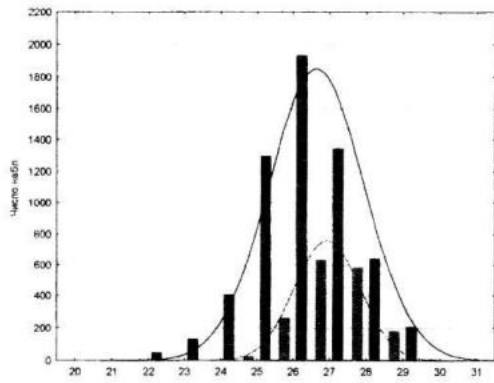
Р и с. 2. Среднегодовая температура поверхностного слоя воды в тропической зоне Тихого океана по данным наблюдений NOAA и модели GFDL CM2.1 за 1982-2003 гг. [2]. Пунктирной линией показано положение на экваторе изотермы 27 °С по модели GFDL CM2.1, а сплошной линией положение изотермы 27 °С по данным NOAA

данные могут попасть на одну из фаз волны. Величина среднеквадратического отклонения для районов Nino-3.4 и Nino-3.4m изменяется в пределах 1,23 – 1,41 и 1,12 – 1,34 соответственно. Следовательно, пороговое значение индекса Эль-Ниньо должно составлять 0,8 – 1 °С (около 3/4 СКО).

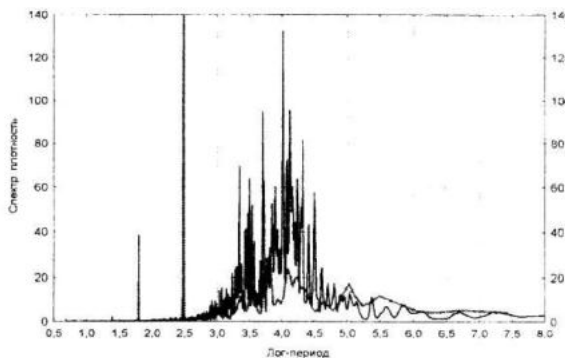
Гистограммы эмпирического распределения ТПО, приведенные на рис. 3, показывают, что оно близко к нормальному. Однако, модельные данные изменяются в более широком диапазоне: от 22 до 30 °С по сравнению с 24 – 29 °С для HadISST.

Корреляционный анализ показал, что величина коэффициента корреляции рядов температуры поверхности океана GFDL и HadISST для обоих районов Nino-3.4 и Nino-3.4m не превышает 0,20 при различных сдвигах по времени. Таким образом, непосредственной привязки модельных данных к натурным не наблюдается.

В спектре модельной температуры поверхности океана (район Nino-3.4m) в интервале 2-7 лет наиболее мощные пики соответствуют периодам 3,4; 4,7 и 6,2 лет, а в спектре ряда HadISST – периодам 3,1, 3,7 и 6,8 года (рис. 4). Хорошо выражены также годовая и полугодовая гармоники. Амплитуда последней в модели



Р и с. 3. Гистограммы распределения ТПО по данным GFDL (Nino-3.4m) (черный цвет) и HadISST (Nino-3.4) (серый цвет)

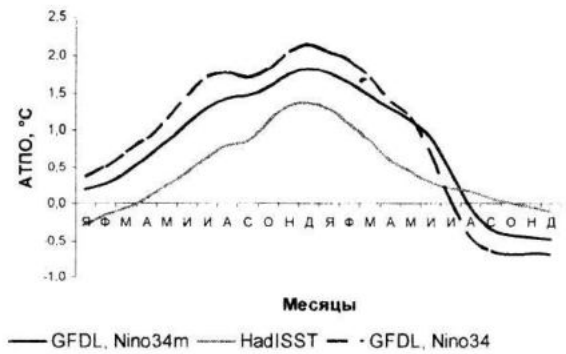


Р и с. 4. Спектры ТПО, построенные по данным GFDL (Nino-3.4m) (черная линия) и HadISST (Nino-3.4) (серая линия)

GFDL воспроизводится завышенно [2, 3], что приводит к некоторому искажению формы годового хода ТПО, характеризующему появлением второго максимума ТПО в годовом ходе. Данная особенность модели GFDL также отмечалась в работе [2].

На основании ряда данных по индексу Эль-Ниньо были выделены события Эль-Ниньо по следующим критериям: аномалия ТПО превышала $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наблюдалась по крайней мере на протяжении 5 месяцев подряд. Всего по данным GFDL в районах Nino-3.4 и Nino-3.4m было выделено соответственно 91 и 85 событий Эль-Ниньо, а по данным HadISST (с использованием порогового значения $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 29 событий Эль-Ниньо.

Композитный ход индекса Эль-Ниньо во время событий Эль-Ниньо показан на рис. 5. Видно, что данные модели GFDL на $0,5 - 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышают данные HadISST на протяжении «0» года и первой половины «+1» года. Частично



Р и с. 5. Композитный индекс Эль-Ниньо, построенный по данным модели GFDL (районы Nino-3.4 и Nino-3.4m) и HadISST (район Nino-3.4)

этот факт объясняется разной величиной порогового значения для модельных и натуральных данных при идентификации событий Эль-Ниньо. Другой характерной особенностью модельных данных является слишком быстрое затухание события Эль-Ниньо: с июня по август «+1» года величина аномалий ТПО уменьшается примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как по натурным данным – всего на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заметим, что в модельных данных хорошо выражен двойной максимум в годовом ходе ТПО.

Некоторые сравнительные характеристики ТПО и событий Эль-Ниньо по модельным и натурным данным представлены в табл. 1. Обращает на себя внимание тот факт, что максимальная интенсивность модельных событий Эль-Ниньо на $1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше по сравнению с выделенными по историческим данным, а средняя продолжительность – на 1 месяц больше.

Частота событий Эль-Ниньо может служить дополнительным критерием контроля правильности выбора порогового значения при идентификации ЭН. Согласно натурным данным события Эль-Ниньо наблюдаются в среднем 1 раз в 4,8 года, а по данным моделирования – 1 раз в 5,9 лет (табл. 1). Для сравнения Куг и др. [3], используя пороговое значение $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ для аномалий ТПО в районе Nino-3.4m, выделили 203 события ЭН за 500 лет. Следовательно, по данным работы [3] Эль-Ниньо наблюдаются в среднем 1 раз в 2,5 года. Вероятно, оптимальная величина порогового значения для выходных данных 500-летнего

Сравнительные характеристики индексов Эль-Ниньо

Характеристики	GFDL		HadISST
	Nino-3.4	Nino-3.4m	Nino-3.4
Средняя многолетняя ТПО, °С	25,6	26,6	26,9
Среднеквадратическое отклонение ТПО, °С	1,42	1,29	0,88
Амплитуда годового хода ТПО, °С	1,7	1,2	1,2
Количество Эль-Ниньо / период наблюдений, лет	91/500	85/500	29/140
Частота событий Эль-Ниньо, лет	5,5	5,9	4,8
Средняя продолжительность Эль-Ниньо, мес.	13	13	12
Максимальная интенсивность Эль-Ниньо, °С	4,73	3,61	2,57

эксперимента модели GFDL должна составлять около 0,8 – 0,9 °С. В этом случае частота событий Эль-Ниньо будет близка к наблюдаемой за последние 140 лет.

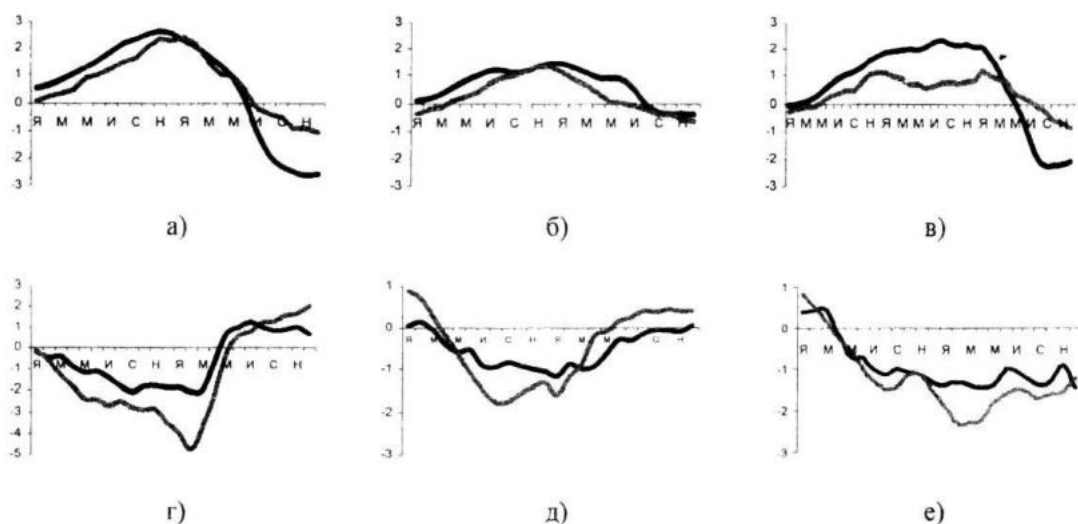
Индекс Южного Колебания. Индекс Южного Колебания (ЮК) определяется как нормированная разность приземного атмосферного давления на о. Таити и в п. Дарвин (Австралия). Индексы ЮК по данным GFDL и BOM (Метеорологическое бюро Австралии) плохо соответствовали друг другу, коэффициенты корреляции индексов ЮК по месяцам изменялись в пределах от –0,2 до 0,3, для целого ряда он составил менее 0,2 (сдвиг по времени не привел к улучшению корреляции). Несмотря на это, внутреннее согласование полей ТПО и приземного атмосферного давления в модели GFDL хорошо выражено, т.к. коэффициент корреляции модельных индексов Эль-Ниньо и Южного Колебания составил –0,71 (для сравнения коэффициент корреляции этих же индексов, рассчитанный по данным HadISST и BOM, составляет –0,83).

Типизация событий Эль-Ниньо. Большинство современных исследователей выделяют 2 типа событий Эль-Ниньо: канонические события и нетипичные. Нетипичные события носят также названия Modoki (Ашок и др. [7]), Central Pacific (Као, Ю [8]), Cold Tongue (Куг, Жин, Ан [9]) и др. В работе Воскресенской и Михайловой [10] было показано, что кроме указанных двух типов существуют также события Эль-Ниньо, которые эволюционируют на протяжении 20 – 30 месяцев. Рассматривать их

как два нетипичных события подряд было бы не совсем правильно, поскольку на протяжении периода эволюции аномалии ТПО практически не опускаются ниже порогового значения. Такие типы событий выделяются по всем рядам натуральных и восстановленных данных (HadISST, LDEO, COBE, ERSST и т.д.). Кроме того, отклики гидрометеорологических полей Атлантико-Европейского региона для данного типа событий Эль-Ниньо существенно отличаются от реакции на другие типы событий [11]. Поэтому был сделан вывод о необходимости поиска решения, содержащего 3 кластера.

С использованием выходных данных модели GFDL, HadISST и BOM был проведен кластерный анализ методом k-средних по двум параметрам – индексу Эль-Ниньо и индексу Южного Колебания. По результатам кластерного анализа были получены композитные характеристики событий Эль-Ниньо для трех разных типов, приведенные на рис. 6 и в табл. 2.

Из трех типов событий Эль-Ниньо моделью GFDL лучше всего воспроизводится первый тип (каноническое ЭН). В «0» год отклонения модельных данных от натуральных не превышают 0,5 °С, а с января по июль «+1» года – не превышают 0,2 °С. В случае летне-осенних короткоживущих событий очень хорошее совпадение наблюдается с сентября по декабрь «0» года, до сентября и после декабря «0» года различия в величинах модельных и натуральных аномалий ТПО составляют 0,5 – 0,7 °С. На рис. 6б и 6в также видно, что в модельных данных



Р и с. 6. Композитные индексы Эль-Ниньо в °С (а - в) и Южного Колебания (г - е), рассчитанные по данным GFDL (черный цвет) и HadISST и BOM (серый цвет), для трех типов событий: весеннего (а, г), летне-осеннего короткоживущего (б, д) и летне-осеннего продолжительного (в, е)

Таблица 2
Сравнительные характеристики типов Эль-Ниньо

Характеристики	Весенний тип		Летне-осенний короткоживущий тип		Летне-осенний продолжительный тип	
	GFDL	HadISST	GFDL	HadISST	GFDL	HadISST
Время начала	апрель	май	июль	август	сентябрь	октябрь
Интенсивность	2,63	2,40	1,42	1,31	2,25	1,10
Продолжительность	13	13	9	7	19	18
Кол-во событий ЭН данного типа к общему кол-ву событий ЭН, %	43	38	38	41	19	21

значительно завышена амплитуда полугодового хода. Это приводит к достаточно большим отклонениям модельных данных от натуральных (более 1,0 °С). Для третьего типа событий ЭН временной ход индекса ЭН в целом воспроизводится хуже, чем для двух предыдущих типов. В частности, летом «+1» года отклонение модельного индекса ЭН от натурального максимально и составляет +1,7 °С.

Временной ход индекса ЮК для всех трех типов ЭН хорошо воспроизводится моделью GFDL (рис. 6г, 6д, 6е), хотя по сравнению с данными BOM сами величины модельного индекса ЮК по абсолютной величине меньше.

Данные табл. 2 позволяют сделать выводы о том, что независимо от типа все модельные события ЭН начинаются

на 1 месяц раньше. В связи с этим продолжительность обоих летне-осенних типов оказывается на 1-2 месяца больше. Интенсивность воспроизведенных моделью GFDL весенних и летне-осенних короткоживущих событий весьма значительно отличается от данных HadISST, но более чем на 1 °С ее величина завышена для летне-осенних продолжительных событий. Частота повторяемости событий ЭН разных типов примерно соответствует данным наблюдений: около 40 % всех ЭН относятся к весеннему и летне-осеннему короткоживущему типам и в 20 % случаев развиваются летне-осенние продолжительные Эль-Ниньо. Незначительные отклонения состоят в том, что в модели GFDL генерируется на 5 % больше событий весеннего типа и на

3 % и 2 % меньше событий летне-осеннего короткоживущего и летне-осеннего продолжительного типов соответственно.

Заключение. Анализ результатов численного моделирования за 500 лет по модели GFDL CM2.1 (доиндустриальный период) показал, что события ЭН хорошо воспроизводятся. Однако обнаружены определенные особенности, которые следует учитывать для более корректного анализа этих событий:

– область низких температур поверхностных вод экваториальной зоны Тихого океана сдвинута на запад на 20° – 30° по долготе. Поэтому для идентификации событий Эль-Ниньо по модельным данным целесообразно использовать район Nino-3.4 m (5° ю.ш. – 5° с.ш., 170° в.д. – 140° з.д.);

– оценка межгодовой изменчивости ТПО в Nino-3.4 m завышена в 1,5 раза, в связи с чем для идентификации событий ЭН по индексу ЭН необходимо использовать величины аномалий ТПО в диапазоне $0,8$ – $0,9$ $^{\circ}\text{C}$;

– амплитуда полугодовой гармоники в модельных данных завышена, что приводит к неоправданно высоким величинам аномалий ТПО в летнее время;

– интенсивность Эль-Ниньо в модели завышена в среднем на $0,5$ – $0,7$ $^{\circ}\text{C}$, а максимальная интенсивность – на 1 $^{\circ}\text{C}$; – продолжительность модельных событий Эль-Ниньо в среднем на 1 месяц больше, чем наблюдаемых, т.к. модельные события ЭН начинаются на 1 месяц раньше;

– интенсивность Южного колебания в модели GFDL ниже, чем по данным наблюдений (атмосферный отклик на события ЭН слабее), хотя согласование полей ТПО и атмосферного давления хорошее.

В то же время, данные моделирования позволяют выделить 3 типа событий ЭН, композитные характеристики которых (за исключением летне-осенних продолжительных событий) в целом хорошо соответствовали данным наблюдений. Модель GFDL также воспроизводит различия между типами Эль-Ниньо, поэтому с ее помощью можно исследовать механизм событий Эль-Ниньо разных типов и их дальние связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Oldenborgh G.J., Philip S.Y., Collins M.* El Nino in a changing climate: A multi-model study // *Ocean Sci.* – 2005. – 1. – PP. 81 – 95.
2. *Wittenberg A., Rosati A., Lau N., Ploshay J.* GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part III: Tropical Pacific Climate and ENSO // *J. of Clim.* – 2006. – 19. – PP. 698 – 722.
3. *Kug J.-S., Choi J., An S.-I., Jin F.-F., Wittenberg A.T.* Warm Pool and Cold Tongue El Nino Events as Simulated by the GFDL 2.1 Coupled GCM // *J. of Climate.* – 2010. – 23. – PP. 1226 – 1239.
4. *Delworth T.L. and Coauthors.* GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and simulation characteristics // *J. Climate.* – 2006. – 19. – PP. 643 – 674.
5. *Rayner N.A. and Coauthors.* Global analyses of seasurface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108. – PP. 4407 – 4432.
6. *Trenberth K. E.* The Definition of El Niño // *BAMS.* – 1997. – 78. – PP. 2771 – 2777.
7. *Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T.* El Niño Modoki and its possible teleconnection // *J. Geophys. Res.* – 2007. – 112. – C11007.
8. *Kao H.Y., Yu J.Y.* Contrasting eastern Pacific and central Pacific types of ENSO // *J. Clim.* – 2009. – 22. – PP. 615 – 632.
9. *Kug J.S., Jin F.F., An S.I.* Two types of El Nino events: Cold tongue El Nino and warm pool El Nino // *J. Climate.* – 2009. – 22. – PP. 1499 – 1515.
10. *Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В.* Классификация событий Эль-Ниньо и погодно-климатические аномалии в Черноморском регионе // *Доповіді НАН України.* – 2010. – №3. – С. 120 – 124.
11. *Михайлова Н.В., Воскресенская Е.Н.* Атлантико-Европейские проявления событий Эль-Ниньо разных типов // *Сб. «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа».* – Севастополь, МГИ НАНУ, 2010. – С. 354 – 363.