

О формировании явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья Тихого океана

А.Л. Бондаренко¹, И.В. Серых²

¹*Институт водных проблем РАН,
119333, Москва, ул. Губкина, д. 3*

E-mail: albert-bond@mail.ru;

²*Институт океанологии РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект, 36*

E-mail: iserykh@gmail.com

Существуют различные гипотезы формирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья (Бондаренко, Жмур, 2004; Бондаренко, 2006; Гущина и др., 2000; Нелепо и др., 2002; Мохов и др., 2000; Сидоренков, 1999). По одной из них (Бондаренко, Жмур, 2004; Бондаренко, 2006), оно образуется океаническими экваториальными волнами Россби Тихого океана. На наш взгляд, эта гипотеза наиболее состоятельна, поскольку обоснована обобщением различной натурной информации. В последние годы авторами статьи проведен анализ большого объема данных о температуре поверхности океана, атмосферном давлении, ветре, полученных с помощью измерений из космоса, и дополнительно подтверждающих состоятельность этой гипотезы. Мы расскажем о волнах Россби и, используя космическую информацию, покажем, как они формируют Эль-Ниньо – Ла-Нинью.

Ключевые слова: Эль-Ниньо, Ла-Нинья, волны Россби, Тихий океан.

Введение

В Мировом океане существуют мощнейшие гидродинамические образования, получившие название волн Россби. Они формируют движения вод океана в горизонтальном и вертикальном направлениях, оказывая существенное влияние на температурный режим океана. Потоки тепла между океаном и атмосферой активно участвуют в формировании термодинамики атмосферы, следовательно, погоды и климата Земли. Вертикальные движения вод океана формируют известные, определяющие погоду и климат, явления, такие как апвеллинг – даунвеллинг, циклоны, тайфуны, торнадо и Эль-Ниньо – Ла-Нинья (Бондаренко, Жмур, 2004; Бондаренко, 2006; Бондаренко, Жмур, 2007; Бондаренко и др., 2008).

Единое глобальное явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья существует в восточном и центральном регионах экваториального Тихого океана и вод, прилегающих к Южной Америке в районе Эквадора, Перу и частично Чили, а отдельно Эль-Ниньо и Ла-Нинья – крайние стадии его развития. Состояние природы, когда вода, обычно холодная ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), начинает нагреваться (до 30°C), принято называть Эль-Ниньо. Когда же температура морской воды падает (до 20°C) принято называть Ла-Нинья (рис. 1а, б, в).

В исследованиях использована информация о течениях и температуре, полученная по программе ТАО с 1983 по 2009 гг. на экваторе в пунктах: I (140° з.д.), II (110° з.д.), а также о температуре океана, атмосферном давлении и ветре. Особое внимание удалено исследованию полей гидрофизических характеристик, полученных благодаря спутниковым данным программы TOPEX/POSEIDON (рис. 1).

Для понимания механизма формирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья, необходимо дать некоторые пояснения.

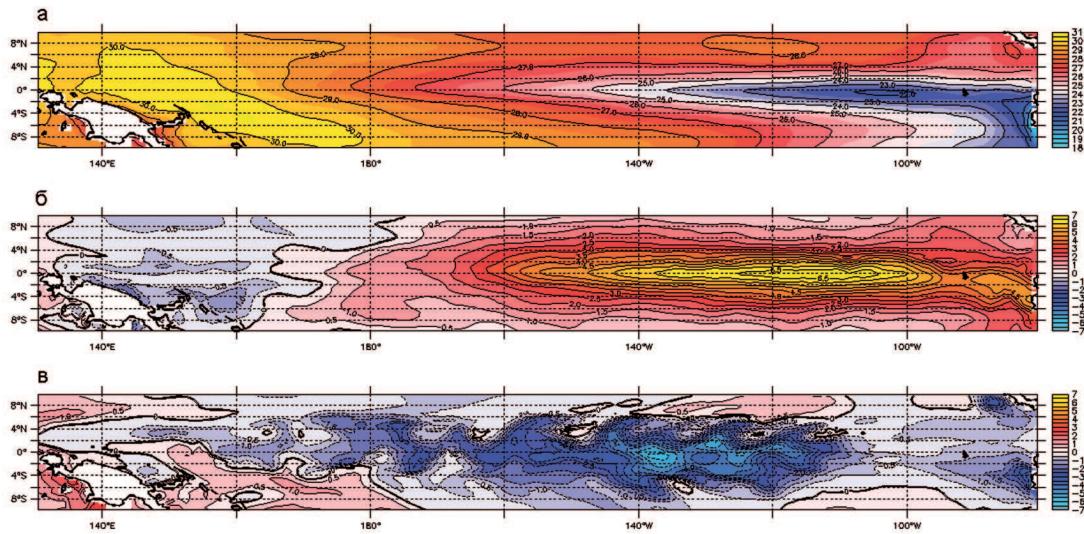


Рис. 1. Средняя температура воды ($^{\circ}\text{C}$) экваториальной области Тихого океана на глубине 15 м за период 01.01.1993 - 31.12.2009 (а) и аномалии температуры во время Эль-Ниньо декабрь 1997 г. (б) и Ла-Нинья декабрь 1998 г. (в) [<http://ecco.jpl.nasa.gov/>]

Волны Россби экваториальной зоны Тихого океана

Волны Россби экваториальной зоны Тихого океана составляют часть взаимосвязанного поля свободных, прогрессивных, распространяющихся в пространстве в горизонтальном направлении волн всего Мирового океана. Движения частиц воды в волнах и волновом переносе (Стоксовом либо Лагранжевом) – это, фактически, волновые течения. Их скорости (эквивалент энергии) изменяются во времени и пространстве. По итогам исследований (Бондаренко и др., 2004; Бондаренко, Жмур, 2007) скорость крупномасштабного течения равна амплитуде колебаний скорости течений волн, фактически – максимальной скорости течения в волне. Поэтому наибольшие скорости волновых течений наблюдаются в областях сильных крупномасштабных течений: западных пограничных и экваториальных.

В соответствии с исследованиями (Бондаренко, Жмур, 2004; Бондаренко, 2006) линии токов течений волн Россби в узкой приэкваториальной зоне ($2^{\circ} - 3^{\circ}$ от экватора на север и юг) и её окружении схематически можно представить в виде линий токов Большой уединённой волны (рис. 2) (Макеев, 2010). Напомним, что линии токов указывают на мгновенное направление векторов течений, или, что одно и то же, направление силы, создающей течения, скорость которых пропорциональна плотности линий токов. На рис. 2 видно, что у поверхности океана в экваториальной зоне плотность линий токов гораздо больше, чем за его пределами, следовательно, и скорости течений больше. Движения частиц воды волн в поверхностном слое образуют поверхностное приэкваториальное течение, в глубинном слое – глубинное противотечение, подъём и опускание частиц воды в волнах – апвеллинг и даунвеллинг. Вертикальные скорости течений в волнах невелики, они составляют приблизительно тысячную часть горизонтальной скорости течения. Если учесть, что горизонтальная скорость на экваторе достигает 1 м/с, то вертикальная равна приблизительно 1 мм/с. При этом, если длина волны равна 1 тыс. км, то область подъёма и опускания волны составит 500 км.

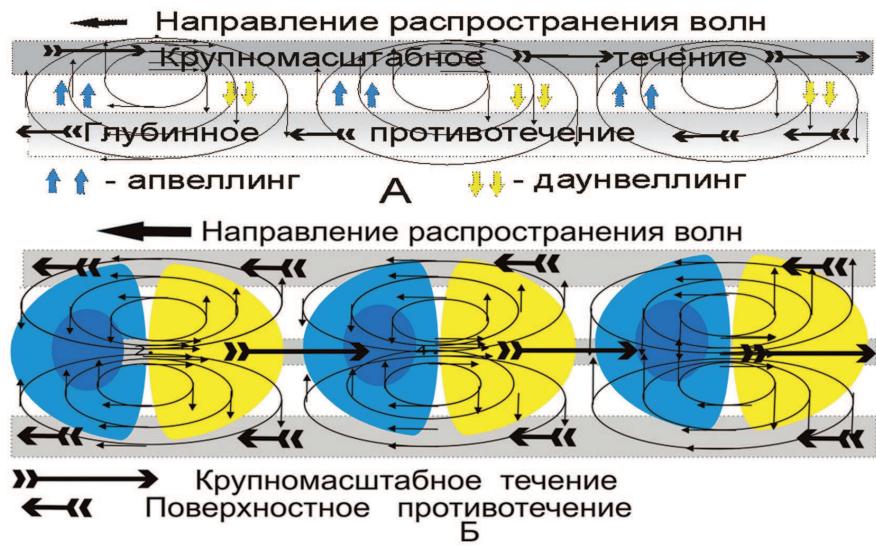


Рис. 2 а,б. Линии токов волн Россби в узкой приэкваториальной зоне ($2^{\circ} - 3^{\circ}$ от экватора на север и юг) в виде эллипсов со стрелками (вектор волновых течений) и её окружение. Вверху – вид по вертикальному сечению вдоль экватора (А), внизу – вид сверху на течение (Б). Голубым и синим цветом выделена область подъёма на поверхность холодных глубинных вод, а жёлтым – область опускания на глубину теплых поверхностных вод (Бондаренко, Жмур, 2007)

Последовательность волн, как во времени, так и в пространстве, представляет собой непрерывный ряд сформированных в модуляции (группы, цуги, биения) малых – больших – малых и т.д. волн. Их свойство приобретать модуляционное строение присуще многим типам волн и играет важную роль в динамике вод океана. Однако механизм его до сих пор не изучен. Предположительно, построение волн в модуляции связано с неким взаимодействием волн с различными периодами. Назовем его модуляционным механизмом. Пока не существует доказательств того, как и почему волны выстраиваются в модуляции, почему иногда они четкие, иногда – нечеткие, почему имеют определенный период и иногда разрушаются.

Параметры волн Россби экваториальной зоны Тихого океана определены по измерениям течений в пункте I эксперимента ТАО, образец которых представлен на рис. 3а и температурным полям, образцы которых изображены на рис. 1б, в. Период волн легко определить графически по рис. 3а, он приблизительно равен 17-19 суткам.

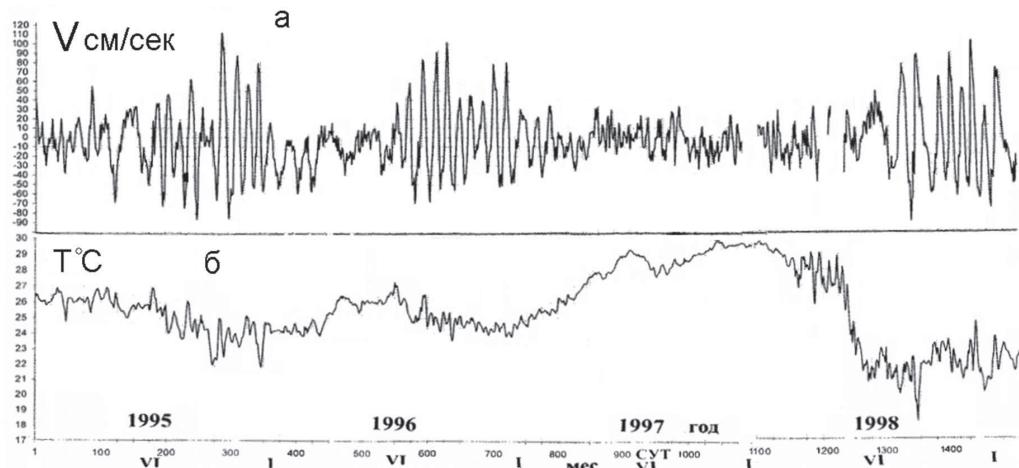


Рис. 3 а,б. Меридиональная составляющая скорости течения V (а) и температура воды (б) в пункте I на экваторе (140° з.д.) на горизонте 10 м за период 1995-1998 гг.

Волновые течения у экватора заметно модулируют. В модуляциях укладывается примерно 18 волн, что по времени соответствует одному году. На рис. За такие модуляции чётко выражены, их три: в 1995, 1996 и в 1998 гг. В экваториальной зоне Тихого океана укладываются десять волн, т.е. почти половина модуляции. Порой модуляции имеют стройный квазигармонический характер. Это состояние можно рассматривать как типичное для экваториальной зоны Тихого океана. Когда-то они выражены нечетко, а иногда волны разрушаются и превращаются в образования с чередованием больших и малых волн или волны в целом становятся малыми. Такое наблюдалось, например, с начала 1997 г. и до середины 1998 г. во время сильного Эль-Ниньо, после которого наступило сильное Ла-Нинья: температура воды опустилась до 20°C, временами до 18°C. Подобные по силе Эль-Ниньо за весь срок наблюдений с 1983 г. по настоящее время происходили дважды: в 1982-1983 гг. и, как мы отмечали, в 1997-1998 гг., сильные Ла-Нинья наблюдались трижды: в 1983, 1988 и 1998 гг.

Остальные параметры волн определились по температурным полям (рис. 1). На фоне общей аномалии холодной воды, расположенной преимущественно в южной части Тихого океана, вдоль экватора выделяются аномалии в диаметре 500-700 км более холодной воды, создаваемые волнами Россби (механизмы их формирования изложены выше). Синим цветом выделены области подъёма холодной воды, светлым – опускания тёплой (рис. 1в). По этим аномалиям холодной воды можно определить параметры волны. По длине экватора в зоне Тихого океана, что соответствует приблизительно 90° долготы и 10 тыс. км, укладывается приблизительно 10 волн. Таким образом, длина одной из них будет равна приблизительно 1000 км. По схемам полей за различное время можно определить скорость движения аномалии, которая равна скорости волны, и рассчитать её период. Применительно к рассматриваемым условиям фазовая скорость волны 50 см/с.

Формирование явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья

В формировании Эль-Ниньо – Ла-Нинья активно участвуют волны Россби. Под действием волн, воды около экватора попеременно будут опускаться и подниматься с периодичностью волн, равной ~ 17-19 суткам. В результате глубинные холодные и теплые поверхностные воды перемешиваются, и в целом на поверхности океана у экватора окажется более холодная вода, чем в удалении от него. Интенсивность смешивания вод по вертикали зависит от таких параметров волны, как ее период и амплитуда колебания скорости ее течения. Температура воды у поверхности океана – T зависит от разности количества тепла, поступившего из атмосферы и глубин океана. Количество тепла, поступившее из глубин океана, зависит от осредненной за некоторое время величины амплитуды колебания скорости течений волн Россби, σ – среднее квадратическое отклонение амплитуды колебаний скорости течения V_θ , зависящее от продолжительности действия этих волн, их частоты $1/\tau$ (τ – период волны) и обратной величины расстояния от поверхности океана до термоклина – $1/H$. Если допустить, что в среднем поток тепла из атмосферы не меняется во времени, то изложенные связи для фиксированного места области развития Эль-Ниньо – Ла-Нинья можно записать условно в такой форме:

$$T = F(\sigma, 1/\tau, 1/H).$$

Для постоянной частоты волн $1/\tau$ это соотношение для фиксированной точки океана можно записать так: $T = K_1 \sigma$, где K_1 – постоянная величина, определяемая экспериментально.

На рис. 4 представлены результаты проверки изложенного объяснения формирования Эль-Ниньо – Ла-Нинья и определения зависимости температуры поверхности воды от амплитуды колебания скорости течения волн Россби. Эта связь хорошо заметна при визуальном рассмотрении поведения параметров волн Россби (рис. 4).

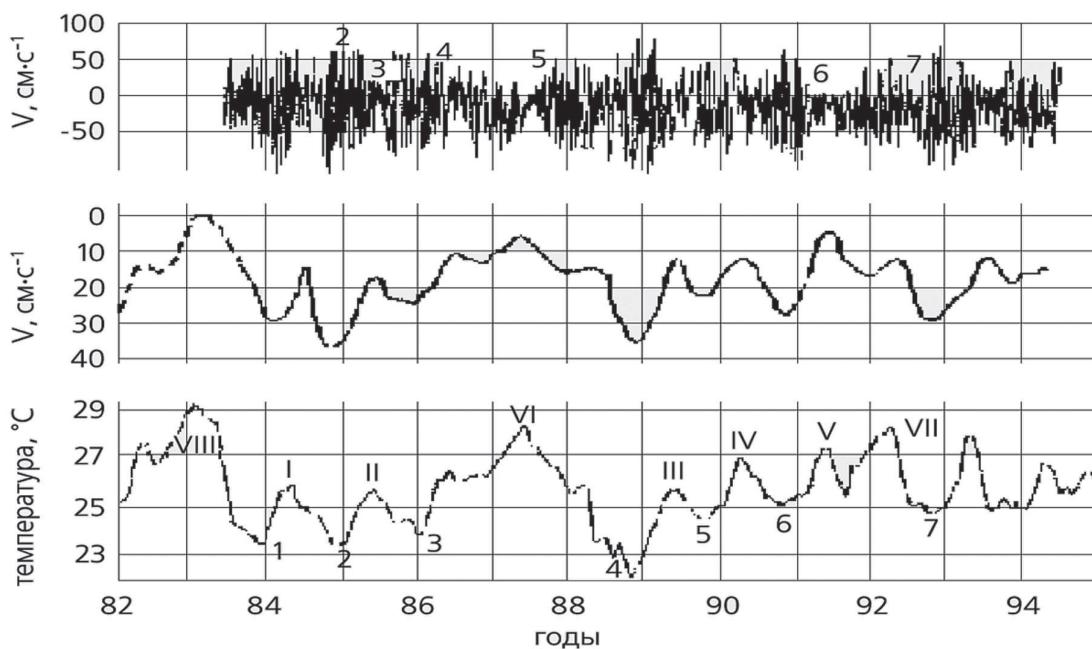


Рис. 4. Характеристики скорости течений и температуры у поверхности океана на экваторе в пункте 140°з.д. Меридиональная составляющая скорости течений (фактически течений волн Россби), измеренных на горизонте 25 м (вверху), среднеквадратическая за полгода величина этих течений волн Россби (в середине), температура поверхности океана (внизу). Римскими и арабскими цифрами отмечены моменты времени. Пояснения в тексте (Бондаренко, 2006; Бондаренко, Жмур, 2007)

Так, моментам I - VII соответствует низкая температура воды $\sim 24^{\circ}\text{C}$ (нижний график) и четкие модуляции с волнами Россби с большой амплитудой колебаний скорости течения (например, верхняя кривая, модуляция 1 - 3). Такое состояние среды наблюдается при Эль-Ниньо. Моментам I - V соответствует слабое Эль-Ниньо, при этом средняя температура поверхности воды $\sim 27^{\circ}\text{C}$ и волновые колебания в модуляциях непродолжительное время имеют малые амплитуды. Моментам VI - VIII соответствует сильное Эль-Ниньо, высокая температура воды $\sim 29^{\circ}\text{C}$ и волновые колебания течений с малыми амплитудами продолжительное время и малыми скоростями крупномасштабных течений. Такая ситуация наблюдается, например, между моментами времени 4-5 (верхний график) и моментами 6-7. Таким образом, температура на поверхности океана, являющаяся показателем развития Эль-Ниньо – Ла-Ниньи, зависит от амплитуды колебания скорости течения волн Россби.

Явления, аналогичные Эль-Ниньо – Ла-Ниньи Тихого океана, наблюдаются и в Атлантическом, и в Индийском океанах, но в менее значительных масштабах.

Зависимость температуры поверхности океана от волн Россби наглядно подтверждается графиком (рис. 5). Высокий коэффициент корреляции (0,88) указывает на то, что изменения температуры поверхности океана существенно зависят от параметров волн Россби, а прочие факторы не оказывают на них существенного влияния.

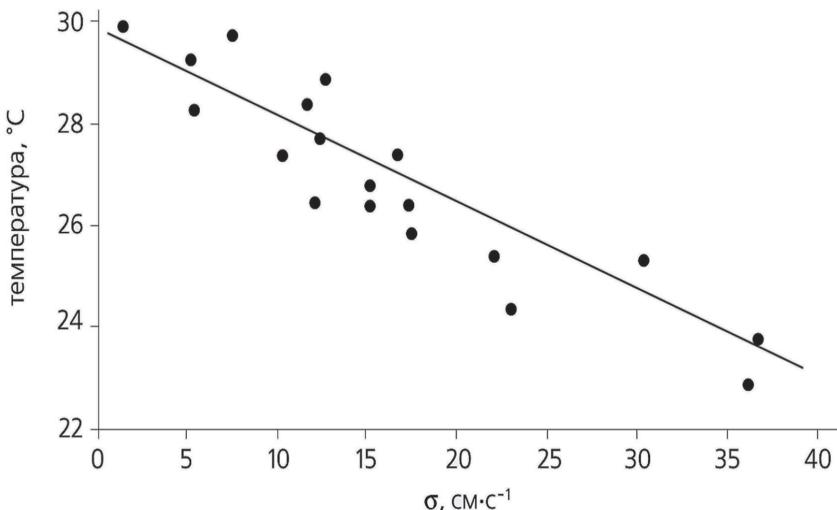


Рис. 5. Связь среднеквадратической (за половину года) величины скорости течений волн Россби с температурой поверхности океана на экваторе (140°з.д.), коэффициент корреляции 0,88
(Бондаренко, Жмур, 2007)

Заключение

В развитии явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья активно участвуют волны Россби. Волны Россби создают попеременно направленную циркуляцию вод в вертикальной плоскости вдоль экватора. В результате этого происходит перемешивание по вертикали холодных глубинных вод с более теплыми поверхностными и, как следствие, на поверхности экваториальной зоны океана оказывается более холодная вода, чем за ее пределами к северу и югу. Фактически механизм формирования положительных и отрицательных аномалий ТПО характерных для Эль-Ниньо и Ла-Ниньи – это апвеллинг – даунвеллинг, обусловленный активностью волн Россби.

Изменчивость во времени и пространстве параметров явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья обусловлена действием некоего модуляционного механизма перестройки волн, в результате активности которого волны Россби выстраиваются в последовательность волн чередующихся амплитуд, с малыми – большими – малыми амплитудами. Период модуляций один год. Иногда эти модуляции разрушаются и превращаются в последовательность волн с хаотически изменяющимися и, в целом, малыми по величине амплитудами. Пропорционально и в такт с величиной амплитуды колебаний скорости течений волн Россби изменяется стадия развития Эль-Ниньо – Ла-Ниньи. В периоды, когда волны выстраиваются в чёткие модуляции, развивается Ла-Нинья, при уменьшении волн в модуляциях развивается слабое Эль-Ниньо, а при разрушении модуляций – сильное. Таким образом, непосредственная причина развития явления Эль-Ниньо – Ла-Ниньи – механизм перестройки волн Россби и связанных с ними крупномасштабных течений.

Для дальнейшего познания феномена Эль-Ниньо – Ла-Ниньи необходимо глубже изучить механизмы формирования волн Россби, их взаимные связи, а также закономерности построения волн Россби в модуляции и их разрушения.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, государственный контракт П1224 от 07.06.2010, проект «Океанический фактор глобальной изменчивости современного климата».

Литература

1. Бондаренко А.Л., Жмур В.В., Филиппов Ю.Г., Щевьев В.А. (2004) О переносе масс воды морскими и океанскими долгопериодными волнами // Морской гидрофизический журнал. Севастополь, 2004. №5. С.24-34.
2. Бондаренко А.Л., Жмур В.В. (2004) О природе и возможности прогнозирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья // Метеорология и гидрология, 2004. № 11. С.39-49.
3. Бондаренко А.Л. (2006) Эль-Ниньо – Ла-Нинья: механизм формирования // Природа, №5. 2006. С. 39-47.
4. Бондаренко А.Л., Жмур В.В. (2007) Настоящее и будущее Гольфстрима // Природа, 2007. № 7. С. 29-37.
5. Бондаренко А.Л., Борисов Е.В., Жмур В.В. (2008) О длинноволновой природе морских и океанских течений // Метеорология и гидрология, 2008. № 1. С. 72-79.
6. Гуцина Д.Ю., Девитт Б., Петросянц М.А. (2000) Объединённая модель атмосферы и тропического Тихого океана. Прогноз явления Эль-Ниньо – Южное Колебание 1997-1998гг // Известия АН. Физика атмосферы и океана, 2000. Т.36. № 5. С. 581-604.
7. Нелено А.Б., Калашников З.Р., Хунджуса Г.Г. (2002) Энергетика взаимодействия между океаном и атмосферой в зоне действия феномена Эль-Ниньо // III конференция «Физические проблемы экологии» Москва. Московский Государственный университет. 2002. № 10. С. 118-123.
8. Макеев Н.Н. (2010) Знаменитое открытие XIX века (К 175-летию открытия солитона). Вестник Пермского Университета. 2010. Вып. 2(39). http://vestnik.psu.ru/files/articles/138_34820.p
9. Мохов И.И., Елисеев А.В., Хворостыянов Д.В. (2000) Эволюция характеристик межгодовой климатической изменчивости, связанной с явлением Эль-Ниньо/Ла-Нинья // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. № 6. С. 741-751.
10. Сидоренков Н.С. (1999) Межгодовые колебания системы Атмосфера–Океан–Земля // Природа. 1999. № 7. С. 26-34.

About formation of the phenomenon the El-Nino – La-Nina of Pacific ocean

A.L. Bondarenko¹, I.V. Serykh²

¹ 119333, Moscow, Gubkina str., 3

E-mails: albert-bond@mail.ru ;

² P.P.Shirshov Institute of Oceanology

117997 Moscow, Nahimovsky pros., 36

E-mails: iserykh@gmail.com ;

There are various hypotheses of formation of the phenomenon the El-Nino – La-Nina. One of them means, that it is formed by oceanic equatorial Rossby waves of Pacific ocean. In our opinion this hypothesis is the most well-grounded, since is justified by generalization of the various full-scale information. In recent years authors of article analyzed a great volume of the data about temperature of a surface of ocean, atmospheric pressure, a wind received by means of measurements from space, and in addition confirming a competence of this hypothesis. We will tell about Rossby waves and, using an information from satellites, we will show, how they form the El-Nino – La-Nina.

Keywords: El-Nino, La-Nina, Rossby waves, Pacific ocean.