

# ПРИРОДА

№ 7 - 1999 г.

Н.С.Сидоренков

## Межгодовые колебания СИСТЕМЫ атмосфера - океан - земля

© Природа

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>



## Межгодовые колебания системы атмосфера—океан—Земля

Н. С. Сидоренков

*Николай Сергеевич Сидоренков, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией планетарной циркуляции и гелиогеофизических исследований Гидрометцентра России. Основные работы посвящены исследованиям неравномерности вращения Земли, движения полюсов и глобальных геофизических процессов. Неоднократно публиковался в журнале «Природа».*

Г ОВОРЯ о колебаниях системы атмосфера—океан—Земля, мы будем рассматривать колебания атмосферы, называемые Южным колебанием, колебания океана, известные по его теплым фазам — Эль Ниньо и холодным фазам — Ла Нинья, и колебания Земли, наблюдаемые как движение географических полюсов.

В 1997–1998 гг. в средствах массовой информации часто упоминались чрезвычайные события (ураганы, наводнения, засухи, небывалые морозы и т.д.), вызванные протекавшим в то время явлением Эль Ниньо — потеплением поверхностных вод в центральной и восточной частях Тихого океана.

Хотя Эль Ниньо, Южное колебание и движение географических полюсов Земли были открыты давно, долгое время они изучались как независимые друг от друга<sup>1</sup>. После проведения в 1957–1958 гг. наблюдений по программе Международного геофизического года стало ясно, что Эль Ниньо неразрывно связано с Южным колебанием, и с тех пор их рассматривают как единое явление Эль Ниньо—Южное колебание (ЭНЮК), подразумевая под этим механические и термические колебания тропической атмосферы и океана с периодами 2–10 лет.

В последние годы автор этой статьи показал, что Эль Ниньо, Южное колебание и связанное с ними движение полюсов Земли суть разные проявления единого глобального процесса — совместных колебаний системы атмосфера—океан—Земля<sup>2</sup>.

© Н.С.Сидоренков

<sup>1</sup> Федоров К.Н. Этот капризный младенец — Эль Ниньо! // Природа. 1984. № 8. С.65–74; Силкин Б.И. Эль Ниньо — Южная осцилляция // Там же. 1996. № 1. С.92–95.

<sup>2</sup> Сидоренков Н.С. Влияние Южного колебания Эль Ниньо на возбуждение чандлеровского движения полюса // Астронсм. журн. 1997. Т.74. № 5. С.792–795.

## КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

В 20-е годы текущего столетия при анализе аномалий атмосферного давления в субтропической зоне Южного полушария английский метеоролог Дж. Уокер заметил: когда атмосферное давление повышено над Тихим океаном, оно понижено над Индийским, и наоборот. Это явление он назвал Южным колебанием (ЮК). Позже выяснилось, что движение масс воздуха вдоль тропической зоны Восточного и Западного полушарий вызывает чередование знака аномалий давления, напоминая гигантские «качели».

Наиболее четко отрицательная корреляция давлений (коэффициент корреляции  $r \approx -0.8$ ) отмечается между двумя районами: Австралии–Индонезии и о-вами Общества в Тихом океане. Иначе говоря, имеются два центра действия ЮК противоположного знака: с одной стороны – Австралийско–Индонезийский, с другой – южнотихоокеанский, и оба они расположены в тропиках Южного полушария (отсюда и название «Южное колебание»).

Для количественной характеристики ЮК используют индекс SOI (Southern Oscillation Index). При  $SOI \leq 0$  давление понижено над Тихим океаном и повышено над Индийским и Австралией. При  $SOI > 0$  картина обратная. К настоящему времени имеется непрерывный ряд среднемесячного индекса SOI начиная с 1866 г.

ЮК неразрывно связано с механическими и термическими колебаниями в океане. Установлено, что чем больше (меньше) индекс SOI, тем ниже (выше) температура водной поверхности в восточной и центральной частях Тихого океана. Поэтому в ЭНК выделяют две крайние фазы: теплую (Эль Ниньо) при  $SOI < 0$  и холодную (Ла Нинья) при  $SOI > 0$ .

При положительных величинах индекса ( $SOI > 0$ ) северо-восточные и юго-восточные пассатные ветры, дующие в тропической зоне Тихого океана, нагоняют теплую воду в его западную часть. Там образуется теплый и толстый верхний перемешанный слой. Глубина термоклина

(границы, отделяющей верхний перемешанный слой от глубинных слоев океана) составляет 200–300 м, а температура поверхности океана (ТПО) достигает 27–30°C. Наоборот, в восточной части Тихого океана в результате такого стока формируется холодный и тонкий верхний перемешанный слой. Глубина термоклина не превышает здесь 50 м, а ТПО колеблется от 20–25°C в океане и до 15–19°C у побережья Южной Америки.

Когда индекс SOI уменьшается и становится отрицательным, градиент давления, обычно существующий между восточной и западной частями Тихого океана, снижается вплоть до обращения знака, пассатные ветры ослабевают, а иногда меняют направление на противоположное – появляются западные ветры. Теплая вода, накопившаяся в западной части Тихого океана, не испытывая сопротивления ветра, устремляется на восток. При подходе такой волны к берегам Южной Америки уровень моря повышается, углубляется граница термоклина, волна движется далее, сворачивая к полюсам, и в виде отраженной волны – на запад. В результате область теплой воды быстро расширяется на всю центральную и восточную части Тихого океана. Такие случаи потепления вод Тихого океана и получили название явления Эль Ниньо.

При Эль Ниньо уровень моря в восточной части Тихого океана примерно на 50 см выше, чем в западной. При Ла Нинья картина меняется на обратную: у западного побережья Южной и Северной Америки уровень моря понижен, а у Индонезии и Индокитая повышен. Это значит, что в тропической зоне имеются межгодовые колебания уровня моря между восточной и западной частями Тихого океана с амплитудой до 50 см.

Спектральный анализ имеющихся длительных рядов индексов Южного колебания и ТПО показал, что в спектрах ЭНК выделяют циклы с периодами 2.1, 2.4, 2.8, 3.6, 6 и, вероятно, 12 лет. В последние десятилетия вместо шестилетнего проявляется 4.8-летний цикл. Важнейшая особенность этих циклов состоит в том, что они в большей

или меньшей степени кратны периодам свободной (1.2 г.) и вынужденной (18.6 г.) нутаций Земли.

Со времени пионерских работ Я. Бьеркнеса (1966) считается, что ЭНЮК есть самоподдерживающееся колебание, в котором аномалии ТПО в экваториальной части Тихого океана влияют на интенсивность пассатных ветров, которые управляют океаническими течениями, формирующими в свою очередь аномалии ТПО. Эта концепция лежит в основе современных работ по физике ЭНЮК.

Обычно строятся нелинейные модели взаимодействия океана с пассатными ветрами и исследуется их поведение в зависимости от амплитуды сезонного цикла температуры воды и скорости течения, параметров, характеризующих силу трения атмосферы с океаном, вариаций термоклина и т.п. Оказалось, что изменение во времени этих параметров порождает на экваторе совместные колебания океана и атмосферы с периодом 3–4 года. Годовые вариации основного состояния океана вызывают нерегулярности периода колебаний и приводят к их синхронизации с годовым циклом, в результате чего появляются субгармоники с периодами 3, 4 и 5 лет.

Таким образом, все современные модели трактуют ЭНЮК как автоколебания единой системы океан–атмосфера, не обращая внимания на то, что в спектре ЭНЮК присутствуют составляющие, кратные не годовому периоду, а периодам свободной и вынужденной нутаций. Поэтому естественно было предположить, что колебания ЭНЮК – это составная часть нутационных движений системы атмосфера–океан–Земля.

#### ЛУННО-СОЛНЕЧНАЯ ПРЕЦЕССИЯ И НУТАЦИЯ ЗЕМЛИ

Как известно, Земля вращается вокруг своей оси со скоростью  $7.29 \cdot 10^{-5}$  рад/с. Угол наклона оси к плоскости земной орбиты – эклиптике – составляет  $66^{\circ}33'$ . Момент инерции Земли относительно оси вращения равен  $8.04 \cdot 10^{37}$  кг·м<sup>2</sup>; момент импульса

$5.9 \cdot 10^{33}$  кг·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Фигура Земли близка к слегка сплюснутому по оси эллипсоиду вращения. Поскольку Луна и Солнце удалены от Земли на конечные расстояния, их силы притяжения не приложены к центру масс планеты. Так, благодаря экваториальному избытку массы вращающаяся Земля подвержена действию момента сил и, как всякий гироскоп, прецессирует<sup>3</sup>. Так как момент импульса Земли очень велик, скорость прецессии очень мала: ось вращения Земли медленно, с периодом 26 тыс. лет, описывает конус, вершина которого совпадает с центром Земли, а ось – перпендикулярна плоскости эклиптики. Соответственно с тем же периодом перемещаются по эклиптике (навстречу видимому годовому движению Солнца) точки равноденствий и солнцестояний (скорость движения –  $1^{\circ}$  за 72 года).

Интересно отметить, что современное положение точек равноденствий, в прошлом находившихся в созвездиях Овна и Весов, уже не соответствуют их прежнему положению. Из-за прецессии они сместились почти на  $30^{\circ}$  к западу и теперь расположены соответственно в созвездиях Рыб и Девы. По той же причине точки солнцестояний перешли из созвездий Рака и Козерога соответственно в созвездия Близнецов и Стрельца. Легко рассчитать, что сохранившиеся до нашего времени названия и обозначения точек равноденствий и солнцестояний соответствовали положениям Солнца в этих созвездиях примерно 2100 лет тому назад. Близкая ситуация сложилась из-за прецессии и с астрологическими гороскопами. Сроки появления созвездий Зодиака, которыми оперируют астрологи, уже примерно на 27 дней опережают истинные сроки вступления в них Солнца, свидетельствуя о том, что они не менялись уже около 1900 лет.

Угол наклона оси вращения Земли к эклиптике ( $66^{\circ}33'$ ) при прецессии не меняется, т. е. географические координаты пунктов на Земле остаются неизменными и геофизические последствия не возникают.

<sup>3</sup> Бялко А.В. Наша планета Земля. М., 1989.



**Схема движения оси вращения Земли в пространстве для внеземного наблюдателя.**

Моменты сил притяжения, которые возникают благодаря экваториальному избытку массы, меняются в зависимости от положений Луны и Солнца по отношению к Земле. Когда Луна и Солнце находятся в плоскости земного экватора, суммарный момент сил исчезает, а когда склонения Луны и Солнца максимальны, то и величина момента наибольшая. Вследствие таких колебаний моментов сил тяготения наблюдается нутация оси вращения Земли, складывающаяся из ряда короткопериодических и небольших по амплитуде колебаний. Главнейшее из них имеет период 18.6 года – время обращения узлов орбиты Луны. С этим периодом ось вращения Земли описывает эллипс: его большая ось перпендикулярна направлению прецессионного движения и равна 18.4"; малая параллельна ему и равна 13.7". Таким образом, ось вращения Земли описывает на небесной сфере волнообразную траекторию, точки которой находятся на угловом расстоянии в среднем около 23°27' от полюса эклиптики.

**ДВИЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ**

Происходящее в процессе ЭНЮК перераспределение воздушных и водных

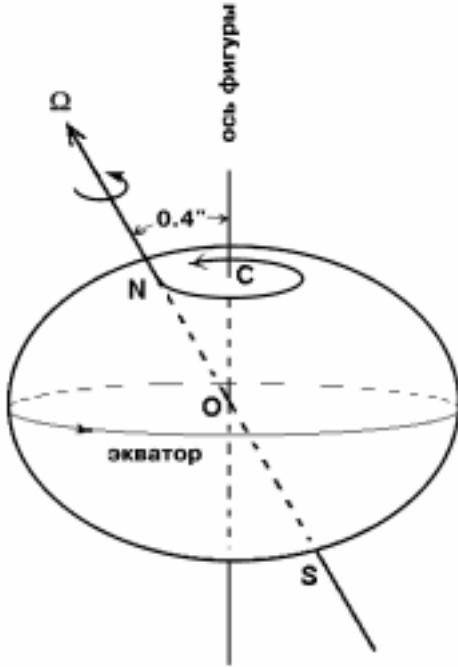
масс изменяет моменты инерции Земли. Ось наибольшего (полярного) момента инерции (назовем ее осью фигуры) отклоняется от оси вращения в плоскости меридиана Австралии – при Эль Ниньо и в плоскости меридиана о.Таити – при Ла Нинья.

Земля, представляя собой гироскоп, преобразует качания оси фигуры в нутацию. С точки зрения земного наблюдателя ось вращения  $\Omega$  перемещается в теле Земли, описывая конус вокруг неподвижной оси фигуры. В результате движутся точки N и S, в которых ось вращения пересекает земную поверхность – мгновенные полюсы Земли. Они перемещаются по земной поверхности вокруг полюсов фигуры (точки C – пересечения оси фигуры с поверхностью Земли) в направлении вращения Земли, т.е. с запада на восток. Это движение полюсов называют свободной нутацией, или чандлеровским движением полюсов. Оно принципиально отличается от лунно-солнечной нутации и прецессии тем, что ось суточного вращения фиксирована в пространстве, но колеблется в теле Земли, в то время как при лунно-солнечной нутации и прецессии ось вращения фиксирована в теле Земли, но движется в пространстве среди звезд.

Леонард Эйлер в 1765 г. теоретически доказал: если ось вращения не совпадает с осью фигуры Земли, то должно происходить движение географических полюсов вокруг полюсов фигуры с периодом

$$T_R = \frac{A}{C-A} \cdot \frac{2\pi}{\Omega} \approx 305$$

звездных суток (где A и C – экваториальный и полярный моменты инерции твердой Земли,  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли в рад/сут). Если географические полюсы движутся, значит, должны меняться широта и долгота пунктов. В XIX в. неоднократно предпринимались безрезультатные попытки найти 305-суточный период в рядах широтных наблюдений обсерваторий Пулково, Вашингто-



*Схема свободной нутации Земли для земного наблюдателя. Ось фигуры, относительно которой момент инерции планеты наибольший, пересекает земную поверхность в точках полюсов фигуры  $S$ . Ось суточного вращения Земли  $\Omega$  не совпадает с осью фигуры, и мгновенный полюс вращения  $N$  описывает вокруг полюса фигуры  $S$  спиралеобразную траекторию.*

на, Берлина и др. В 1891 г. С.Чандлер опубликовал результаты своего анализа широтных наблюдений и показал, что в динамике этих изменений выявляется колебание с периодом 428 сут. Столь неожиданный результат поначалу вызвал сомнения. Однако вскоре С.Ньюком указал, что 305-суточный период верен в случае, если бы Земля была абсолютно твердой. Упругие деформации Земли и океанов могут вызвать увеличение периода с 10 до 14 мес. Дальнейшие исследования подтвердили этот вывод и дали количественное доказательство удлинению 305-суточного периода.

Разница в периодах возникает из-за упругих деформаций Земли, которые описываются безразмерными числами,

введенными А.Лявом. В частности, число Лява  $k$  равно отношению дополнительного потенциала, возникающего вследствие деформаций, к возмущающему потенциалу. Для абсолютно твердой Земли  $k = 0$ , а для жидкой, но с тем же распределением плотности по глубине,  $k = k_F = 0.96$ . С помощью  $k$  и  $k_F$  находится связь периода свободной нутации упругой Земли  $T_0$  с периодом — абсолютно твердой  $T_R$

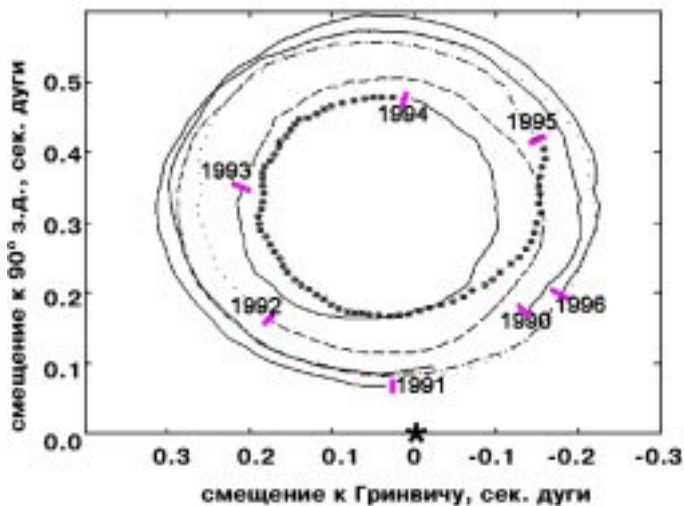
$$T_0 = \frac{k_F}{k_F - k} T_R.$$

Экваториальное утолщение Земли упруго откликается на изменение в положении мгновенной оси ее вращения, и тем сильнее, чем больше значение  $k$ . Если бы Земля была жидкой ( $k = k_F$ ), подстройка оси фигуры к оси вращения была бы полной и свободная нутация отсутствовала бы ( $T_0 \rightarrow \infty$ ). Реальная Земля не жидкая и не твердая. Как показывают результаты наблюдений приливов,  $k = 0.29$ . При этом значении  $k$  период  $T_0$  должен быть 437 сут. Анализ широтных наблюдений дает величину  $T_0$  в диапазоне от 433 до 441 сут, что практически совпадает с оценками по приливным данным. Таким образом, период, найденный Чандлером, и есть период свободной нутации Земли.

Помимо чандлеровского движения полюсов (ЧДП) имеется еще и вынужденное движение полюсов с периодом один год. Оно обусловлено сезонным перемещением воздушных и водных масс по земной поверхности. Сложение чандлеровского и годового движений порождает биения, в результате которых радиус траектории движения полюса меняется от максимального до минимального с периодом примерно 6 лет. Наибольшее удаление мгновенного положения полюса от среднего не превышает 15 м.

Движение полюсов порождает прилив в атмосфере и Мировом океане, который называется полюсным приливом. Его амплитуда в океане ( $\approx 0.5$  см) зависит от величины смещения полюса. Волна полюсного прилива, взаимодей-

Траектория движения Северного географического полюса Земли в 1990–1996 гг. (начало каждого участка отмечено соответствующим годом). Звездочкой отмечено начало координат, отвечающее положению среднего полюса эпохи наблюдений в 1900–1905 гг. С тех пор спиралеобразная траектория мгновенного полюса постепенно смещалась в направлении Северной Америки со скоростью около 0.1 м/год. Из-за этого векового движения полюса современное положение центра спирали находится в стороне от начала координат.



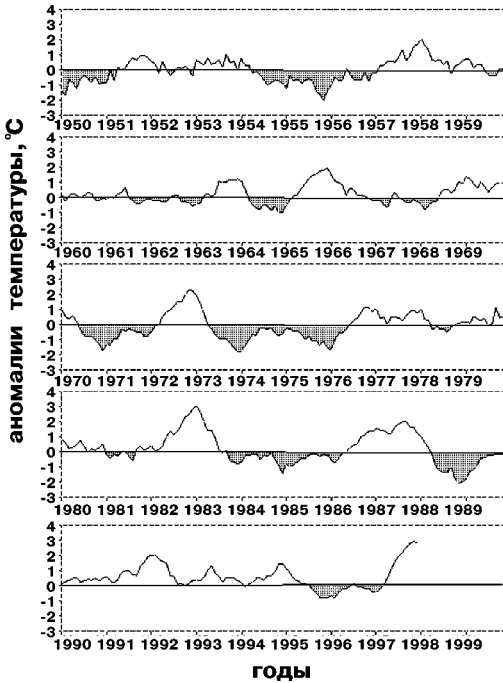
ствую с лунно-солнечными нутационными движениями атмосферы и океана, значительно усиливается и влияет на течение ЭНЮК. В системе атмосфера-океан-Земля существуют нелинейные колебания: атмосфера и океан раскачивают Землю, а Земля влияет на колебания атмосферы и океана. В результате в спектре ЭНЮК появляются циклы, кратные периоду Чандлера (1.2 г.) и лунному (18.6 г.). Возникает явление комбинационного резонанса, при котором даже воздействия малой мощности способны возбудить движение полюсов Земли и связанный с ним комплекс процессов в океане и атмосфере. Отсутствие в спектре ЭНЮК циклов с периодами 1.2 и 18.6 г., вероятно, связано с конкуренцией — подавлением одних гармоник другими в ходе их взаимодействия.

Изменения интенсивности ЭНЮК во времени приводят к нестабильности возбуждения ЧДП, к изменению его характеристик (амплитуды, фазы, коэффициента затухания и т.д.). Например, в 1925–1945 гг. наблюдалось значительное ослабление ЧДП (в несколько раз уменьшилась его амплитуда, удлинился период, изменилась фаза). В этот же интервал времени отмечались значительные аномалии в повторяемости теплых фаз ЭНЮК. Фазы с  $SOI < 0$  возни-

кали реже, а в период с 1930 по 1940 г. длительных интервалов с  $SOI < 0$  вообще не было.

Около 1910 и 1955 гг. наблюдались максимальные амплитуды ЧДП, а за 10–15 лет до них фазы  $SOI < 0$  были наиболее длительными, интенсивными и, главное, кратными периоду Чандлера. Эти факты демонстрируют согласованность ЭНЮК с движением географических полюсов, т.е. с колебаниями Земли относительно оси суточного вращения.

Цикличность ЭНЮК тесно связана с вариациями угловой скорости вращения Земли. Механизм связи такой. Во время Эль Ниньо повышается ТПО и выделяется скрытое тепло конденсации; в результате экваториальная тропосфера разогревается, увеличивается разность температур между экватором и полюсами, а это ведет к усилению западных ветров, росту момента импульса атмосферы и, как следствие, — к замедлению скорости вращения Земли (момент импульса системы атмосфера-Земля сохраняется). Во время Ла Нинья аномалии ТПО вдоль большей части экватора отрицательны, скрытого тепла выделяется меньше и температура экваториальной тропосферы понижается; ослабевает контраст температуры между экватором и полюсами, падает сила западных ветров, момент импульса ат-



*Ход аномалий температур поверхности океана, осредненных по области, ограниченной 5с.ш.-5ю.ш. и 170°-120°з.д. в период с 1950 по 1997 г. Положительные аномалии — периоды Эль Ниньо, отрицательные (заштрихованы) — периоды Ла Нинья. Эль Ниньо 1997-1998 гг. — второе по силе за последние сто лет; самое сильное наблюдалось в 1982-1983 гг.*

мосферы уменьшается и скорость вращения Земли увеличивается. Фазы ЭНЮК повторяются чаще всего через 6, 3,6, 2,8, 2,4 и 2,1 года, в итоге наблюдается и аналогичная цикличность скорости вращения Земли.

Резонансы вблизи периода Чандлера и его субгармоник свойственны не только системе Земля-атмосфера-океан, но и Солнечной системе. У многих планет, Луны и астероидов периоды движения соизмеримы с чандлеровским и шестилетним периодами. Например, время обращения Юпитера, Сатурна и Урана соответственно ровно в 10, 25 и 70 раз больше периода Чандлера. Известно также, что узлы лунной орбиты непрерывно перемещаются по эклиптике к западу, со-

вершая полный оборот за 18,6 г. Перигей же лунной орбиты движется к востоку, оборачиваясь за 8,85 г. В результате такого встречного движения соединения узла с перигеем происходят ровно через 6 лет. Земля, двигаясь в годичном обращении вокруг Солнца с запада на восток, догоняет точку перигея Луны через каждые 412 сут, что близко к периоду Чандлера. Если же из частоты годового обращения Земли вычесть частоту движения узла и перигея Луны, то получится точная частота Чандлера. Все эти совпадения свидетельствуют о том, что за миллиарды лет эволюции Солнечной системы Земля, скорость ее суточного вращения и даже процессы, происходящие на ней, синхронизировались с циклами Солнечной системы.

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

При Ла Нинья пассатные ветры гонят поверхностную воду от берегов Америки к западу. Стог сопровождается апвеллингом — подъемом глубинной холодной воды, очень богатой кислородом и питательными веществами. Это создает благоприятные условия для развития планктона, который служит кормовой базой для рыб. В результате у Тихоокеанского побережья Южной Америки откармливаются и быстро размножаются многочисленные стада рыб, а также связанные с ними пищевыми цепями разнообразные морские животные и стаи птиц.

Иное дело при Эль Ниньо: накопление теплой, бедной кислородом воды у побережья Южной Америки подавляет апвеллинг и вынос питательных веществ в верхние слои океана. Изменения гидрологических условий и первичной продуктивности океана приводят к нарушению пищевых цепей. Поэтому Эль Ниньо — это катастрофа для многих морских экосистем. Преодоление его негативных экологических последствий занимает годы.

Поле ТПО определяет расположение областей атмосферной конвекции над океаном в тропиках. При Ла Нинья



**Долготно-временной разрез аномалий температуры морской поверхности на экваторе (5 с.ш.—5 ю.ш.) Тихого океана с февраля 1995 г. по январь 1998 г. Виден полный цикл эволюции Ла Нинья с марта 1995 г. по февраль 1997 г. В марте 1997 г. возникло Эль Ниньо, которое постоянно усиливалось и достигло максимальной стадии развития в декабре 1997 г. Аномалии температуры на 100 э.д. превысили +4С.**

конвективная активность развита над Индонезией, Австралией и прилегающей западной частью Тихого океана и подавлена в восточной части, прилегающей к Южной Америке, где из-за охлаждения воздуха холодной водой океана существует пассатная инверсия — повышение температуры воздуха с высотой вместо обычно наблюдаемого падения температуры. В западной тропической части Тихого океана идут обильные дожди, а в восточной стоит очень сухая погода. При Эль Ниньо, когда аномалии ТПО в восточной части становятся положительными, задерживающее влияние пассатной инверсии на вертикальные движения воздуха ослабевает и конвективная активность растет. Эта область повышенной конвективной активности и обильных осадков перемещается вместе с теплой водой

вдоль экватора из западной в центральную и восточную части Тихого океана.

Такая миграция в атмосфере имеет далеко идущие последствия. При Эль Ниньо в окрестностях его Австралийско-Индонезийского центра действия, где обычно стоит влажная дождливая погода, наступает засуха. В центральных и восточных частях Тихого океана обычно засушливая погода сменяется периодом повышенной влажности. На западном побережье Южной и Северной Америки, где осадков при Ла Нинья практически не бывает, начинают идти проливные дожди. Они вызывают наводнения, оползни, уничтожают посевы, разрушают дороги и строения.

Таким образом, при Эль Ниньо, которое может длиться несколько лет, в экваториальной зоне Тихого океана наступает подлинное экологическое бед-

ствии: мигрируют или гибнут популяции рыб, ракообразных, морских животных, стаи птиц, страдает население прибрежных стран Южной Америки (особенно Эквадора и Перу), занимающееся рыболовством и сбором ценного птичьего помета — гуано. Большой экономический ущерб наносят сопутствующие стихийные бедствия. В эти же периоды экономика Австралии, Африки, Индонезии и стран бассейна Индийского океана страдает от сильных засух. Дефицит осадков в большей части Восточного полушария приводит к заметному снижению мирового урожая зерновых культур, поскольку большая часть посевных площадей находится именно в этом полушарии. Чем сильнее Эль Ниньо, тем тяжелее описанные последствия. По неполным данным, ущерб от одного из самых интенсивных явлений Эль Ниньо 1982–1983 гг. оценен более чем в 13 млрд долл. США; к его ужасающим последствиям относится гибель свыше 2 тыс. человек.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цикличность Эль Ниньо—Южное колебание свидетельствует о том, что движения атмосферы и океана тесно связаны с лунно-солнечной нутацией и движением полюсов Земли. Некоторые супергармоники вынужденных нутационных движений атмосферы и океана близки или равны субгармоникам периода свободного движения полюсов Земли. На этих комбинационных частотах происходит резонансное возбуждение чандлеровского движения полюсов Земли.

Движение полюсов Земли возмущает потенциал центробежных сил и вызывает в океане и атмосфере полусный прилив, который в свою очередь влияет на движения атмосферы и океана и протекающие в них процессы. В итоге в системе атмосфера—океан—Земля наблюдаются нелинейные коле-

бания с характерными для них конкуренцией, синхронизацией и комбинационным резонансом. Нутационные движения Земли, атмосферы и океана упорядочиваются и усиливаются. В результате в спектре ЭНЮК появляются циклы с периодами, кратными чандлеровскому периоду и периоду вынужденной нутации 18.6 г. Таким образом, вся система Земля—океан—атмосфера совершает согласованные колебания.

ЭНЮК оказывает существенное влияние на гидрологический режим Мирового океана и вызывает аномалии погоды по всему земному шару. Оно влияет на жизнь биосферы. Продуктивность биосферы из-за его воздействия испытывает вынужденные колебания с периодами 2–10 лет. Во время Эль Ниньо складывается крайне неблагоприятная экологическая обстановка для холодолюбивых форм планктона, рыб, морских животных и птиц. Биологическая продуктивность Мирового океана заметно снижается. В периоды Ла Нинья экологические условия становятся благоприятными и продуктивность восстанавливается. Мировой сбор зерновых и технических культур падает при Эль Ниньо и растет при Ла Нинья. Опасные явления погоды (сильные ливни, ураганы, морозы, засухи и т.п.) и связанные с ними стихийные бедствия (наводнения, оползни, пожары, аварии и т.п.) усугубляют негативные последствия Эль Ниньо.

Дальнейшие эмпирические и теоретические исследования позволят заранее вычислять параметры колебаний системы Земля—океан—атмосфера и делать успешные прогнозы очередного Эль Ниньо, предупреждая тем самым его тяжелые экологические и социально-экономические последствия.

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-02-17631).**