

речной формы пучка используется CCD-камера (15) и люминесцентный экран (14).

При создании ускорителя использован ряд новых разработок. Впервые в ускорительной технике созданы прецизионные поворотные магниты на основе редкоземельного постоянного магнитного материала с уровнем рабочего поля ~ 1 Тл в рабочем объеме $0.5 \times 0.25 \times 0.02$ м³. Нововведением является инжекция сгруппированного пучка через компактный α -магнит, также созданный на основе постоянных магнитов. Впервые в электронных ускорителях применяется призматическая бипериодическая ускоряющая структура (ПБУС) [2]. В отличие от обычных аксиально-симметричных ускоряющих структур ПБУС имеет малые поперечные размеры, что позволяет решить проблему первой орбиты. Кроме того, данная структура обладает свойствами высоко-частотной квадрупольной фокусировки, величина и знак оптической силы которой зависят от соотношения геометрических размеров пролетного отверстия и размеров резонатора и от фазы СВЧ-поля. Питание ускоряющей структуры осуществляется от импульсного многолучевого клистрона, работающего в режиме автоколебаний. Наряду с оригинальной схемой СВЧ-питания все это позволило создать самый компактный в мире импульсный ускоритель электронов на энергию 70 МэВ. Основные параметры ускорителя, достигнутые к концу 2001 г., приведены в таблице.

В настоящее время выведен пучок с последней, 14-й орбиты. Его энергия составляет 68.4 МэВ при импульсном токе 4 мА. На ускорителе начаты первые физические эксперименты. Планируется провести фундаментальные исследования в области ядерной

Основные параметры импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ

Энергия инжекции	50 кэВ
Приrost энергии / оборот	4.8 МэВ
Число оборотов	14
Энергия на выходе	14.9–67.7 МэВ
Импульсный ток пучка при энергии 68.4 МэВ	4 мА
Увеличение длины орбиты / оборот	1 л
Рабочая частота	2.856 МГц
Длительность импульса	2–20 нкс
Максимальный коэффициент заполнения рабочего цикла	0.4%
Импульсная мощность клистрона, импульсная / средняя	6 МВт / 25 кВт
Поле поворотных магнитов	0.956 Т
Габаритные размеры	2.2 × 1.8 × 0.9 м
Масса	3200 кг

физики, изучение различных методов генерации электромагнитного излучения, медицинские исследования, и в частности наработку радиоактивных изотопов.

Литература

1. *Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Karev A.I. et al.* 70 MeV Electron Racetrack Microtron Commissioning // Proc. of the 2001 Particles Accelerator Conference, Chicago, June, 2001.
2. *Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Ermakov D.I. et al.* Rectangular Accelerating-Focusing Structures High Power Tests // Proc. of the 2000 European Particles Accelerator Conference, Vienna, May, 2000.

Поступила в редакцию
03.04.02

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.465.7

ЭНЕРГЕТИКА ФЕНОМЕНА ЭЛЬ-НИНЬО

Г.Г. Хунджуа, А.Б. Нелепо

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: nelepo@mail.ru

На основании модели формирования Тихоокеанского тропического бассейна рассчитана дополнительная энергия, аккумулированная в нем. Оценено максимальное число тропических циклонов, которые могут образоваться при поступлении в атмосферу во время действия Эль-Ниньо этой дополнительной энергии.

Феномен Эль-Ниньо заключается в резком повышении температуры (на 5–9°C) поверхностного слоя воды на востоке тропической зоны Тихого океана на площади порядка 10^7 км². Этот эффект быстрого нагрева предполагает наличие мощных и долгодействующих источников тепла.

Однако, согласно общепринятой модели радиационного и теплового баланса системы океан–атмосфера, приход и расход энергии в годовом цикле компенсируют друг друга. Следовательно, накопления энергии в годовом цикле тепломассообмена в системе нет. В частности, этим обеспечивается

стационарность климата Земли [1].

В связи с этим возникает вопрос: за счет какой энергии повышается температура поверхностного слоя океана в зоне действия Эль-Ниньо?

По моделям, построенным в последние годы различными авторами (см., напр., [2–4]), началу феномена Эль-Ниньо предшествует период накопления тепла в западной части тропического пояса Тихого океана. По этой схеме поверхностные воды океана транспортируются и удерживаются восточными ветрами — пассатами в западной части Тихого океана в районе Индонезии. При своем движении на запад поверхностные слои воды нагреваются проникающей в океан солнечной радиацией. К моменту достижения западной части Тихого океана температура поверхностного слоя воды достигает 29–30°C. В восточной же части Тихого океана температура составляет 22–24°C, что является следствием апвеллинга (подъема глубинных холодных вод).

Ветровой нагон вод приводит к погружению поверхностного теплого слоя воды и образованию так называемого Тихоокеанского тропического бассейна, имеющего глубину 100–200 м и температуру воды 29–30°C. Работа на подтопление поверхностного теплого слоя и перенос воды через океан совершаются за счет механической энергии пассатов. Формирование такого огромного резервуара тепла — главное необходимое условие перехода обычного режима теплообмена к феномену Эль-Ниньо.

По неизвестным пока причинам раз в 3–7 лет пассаты ослабевают. Это ведет к тому, что теплые воды Тихоокеанского тропического бассейна устремляются на восток, создавая одно из самых сильных теплых течений в Мировом океане, — возникает Эль-Ниньо.

Однако в приведенной выше модели не были рассмотрены процессы накопления тепла в Тихоокеанском тропическом бассейне. Таким образом, вопрос об источниках тепловой энергии остается открытым.

По нашим представлениям, накопление тепловой энергии происходит в результате изменения составляющих теплообмена в Тихоокеанском тропическом бассейне, в частности эффективного излучения океана ($F_{\text{эфф}}$) и контактного теплового потока между океаном и атмосферой (q_c).

Эффективное излучение поверхности океана представляет собой разность между собственным тепловым излучением поверхности океана U_n и противоизлучением атмосферы G_0 , т. е. $F_{\text{эфф}} = U_n - G_0$. Известно (см., напр., [5]), что спектр противоизлучения атмосферы совпадает со спектром излучения поверхности океана U_n , за исключением так называемого атмосферного окна прозрачности (8–14 мкм). В этом диапазоне длин волн атмосфера практически не поглощает и не излучает ИК-радиацию.

Г. Больцом в 1949 г. было показано, что при облачности атмосфера перестает пропускать длинновол-

новое излучение, закрывая окно прозрачности из-за наличия в облаках капельной жидкости. Известно, что над Тихоокеанским тропическим бассейном в атмосфере формируется теплая и влажная область с развитой облачностью. Наличие капельной жидкости в облаках приводит к изменению радиационного обмена между океаном и атмосферой. Закрывается окно прозрачности атмосферы, и поверхность океана начинает нагреваться.

Таким образом, в Тихоокеанском тропическом бассейне ИК-канал теплообмена закрыт (или сильно уменьшен). Это приводит к появлению дополнительного мощного источника энергии для нагрева Тихоокеанского тропического бассейна ($F_{\text{эфф}}$ составляет величину $\sim 67 \text{ Вт/м}^2$ [6]).

Другим источником тепловой энергии для нагрева Тихоокеанского тропического бассейна является контактный теплообмен с атмосферой. В работе [7] было показано, что в результате формирования слоя инверсии температуры на начальном участке приводного слоя атмосферы контактный тепловой поток q_c направлен от атмосферы в океан, а его среднегодовые значения составляют $\sim 15 \text{ Вт/м}^2$.

Таким образом, в результате изменения режимов теплообмена в Тихоокеанском тропическом бассейне происходит уменьшение потерь океана на ИК-излучение и изменение направления контактного теплового потока.

По данным спутниковых и инструментальных наблюдений, известно, что температура воды в Тихоокеанском тропическом бассейне на 5–9°C выше температуры окружающих водных масс. Определим его объем ($V = abz$), учитывая, что a — расстояние между меридианом 180° з.д. и берегом Индонезии ($4.4 \cdot 10^6 \text{ м}$), b — ширина бассейна (10^6 м), z — его глубина (150 м). В результате получаем:

$$V = 6.6 \cdot 10^{14} \text{ м}^3.$$

Следовательно, масса бассейна будет равна

$$M = \rho V = 6.6 \cdot 10^{17} \text{ кг},$$

где ρ — плотность воды (1000 кг/м^3).

Оценим дополнительную энергию, аккумулированную в сформировавшейся термодинамической структуре (Тихоокеанском тропическом бассейне):

$$\Delta Q = cM\Delta\Theta,$$

где c — удельная теплоемкость воды ($4200 \text{ Дж} \times (\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$). При $\Delta\Theta = 5^\circ\text{C}$ получим $\Delta Q = 1.4 \times 10^{22} \text{ Дж}$.

Указанная энергия дополнительно поступит в атмосферу во время действия Эль-Ниньо (в течение 6–18 месяцев).

Для получения нижней оценки ΔQ_l воспользуемся результатами, приведенными в работе [6], где показано, что в Тихоокеанском тропическом бассейне суммарный тепловой поток определяется в основном испарением. По общепринятой среднегодовой радиационной модели атмосферы поток на

испарение (q_e) составляет 40% от поступающей в систему океан–атмосфера энергии. Таким образом,

$$\Delta Q_l = 1.4 \cdot 10^{22} \cdot 0.40 = 5.6 \cdot 10^{21} \text{ Дж.}$$

Следовательно, количество водяного пара, поступающего в атмосферу (m_v), при полном расходе энергии ΔQ_l будет равно

$$m_v = \Delta Q_l / L = 5.6 \cdot 10^{21} / 2.5 \cdot 10^6 \sim 2.2 \cdot 10^{15} \text{ кг,}$$

где L — удельная теплота парообразования ($2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг). Накопленная в Тихоокеанском тропическом бассейне энергия огромна. Чтобы наглядно представить эту величину, сравним ее с энергией тропического циклона.

Средняя энергия тропического циклона, по оценкам, приведенным в работе [8], равна энергии, освобождающейся при одновременном взрыве четырехсот 20-мегатонных ($2 \cdot 10^{10}$ кг) ядерных зарядов. Так как энергия, выделяемая при взрыве 1 кг тротила, равна $4.2 \cdot 10^6$ Дж, то выделенная при взрыве энергия четырехсот зарядов составит

$$Q = 400 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 4.2 \cdot 10^6 \sim 3.4 \cdot 10^{19} \text{ Дж.}$$

Зная величины ΔQ_l и Q , оценим максимально возможное число тропических циклонов (N), которые могут образоваться при поступлении в атмосферу дополнительной энергии ΔQ_l из Тихоокеанского тропического бассейна:

$$N = \Delta Q_l / Q \sim 160.$$

По среднестатистическим данным, когда возникает Эль-Ниньо, в тропической части Тихого океана зарождается около 30 тропических циклонов; следовательно, запас энергии в Тихоокеанском тропическом бассейне намного больше энергии тропических циклонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01-05-64435).

Литература

1. Иванов А.А. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978.
2. Webster P.J., Palmer T. // Nature. 1997. **390**, No. 6660. P. 562.
3. Джоунс Ф.Д., Уигли Т. // В мире науки. 1990. № 10. С. 62.
4. Тимофеев Н.А., Юровский А.В. // Иссл. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 31.
5. Общая геофизика / Под ред. В.А. Магницкого. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 203.
6. Хунджуа Г.Г., Нелепо А.Б. Препр. физ. ф-та МГУ. 2000. № 4.
7. Хунджуа Г.Г., Нелепо А.Б. и др. // Изв. РАН, ФАО. 1997. № 33. С. 298.
8. Вайсберг Дж. Погода на Земле. Л.: Гидрометеиздат, 1980.

Поступила в редакцию
01.10.01

УДК 551.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Ю.Г. Пыркин, В.П. Петров, И.Н. Иванова, М.А. Силаев

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: psiwc48@phys.msu.su

В работе приведены результаты исследования вертикальной и горизонтальной структур турбулентности, генерируемой колеблющейся решеткой, как в чистой воде, так и в суспензии. Вблизи решетки обнаружена горизонтальная периодическая структура колебаний жидкости, имеющая струйный характер. С удалением от колеблющейся решетки возвратно-поступательное движение жидкости затухает, причем при прочих равных условиях значения скорости (дисперсии) в суспензии меньше, чем в чистой воде. Это связано с поглощением энергии возмущений твердыми частицами и замедлением их скорости выпадения.

Турбулентный режим движения жидкостей является наиболее характерным режимом движения как в природных потоках, так и во многих технологических процессах (движение различных жидкостей по трубопроводам, каналам и пр). Экспериментальные исследования влияния турбулентности на природные или технологические процессы можно одинаково успешно проводить как в естественных, так и в лабораторных условиях. Причем весьма часто последнее направление бывает даже предпочтительнее [1–13].

Ряд известных лабораторных исследований [2, 6, 9–11, 13] проводился на установках, представляющих собой емкость, заполненную жидкостью, в которой турбулентность создается горизонтальной решеткой (в некоторых случаях двумя), колеблющейся в вертикальной плоскости с небольшой амплитудой. Выбор именно такой схемы генерации турбулентности (имеющиеся установки отличаются лишь некоторыми особенностями в конструкции и технико-экспериментальным оборудованием) сделан