

же: $Ki = \tau_{\omega} / \tau_i$. Для крупномасштабных движений атмосферы и океана это число много меньше единицы. Так, при скорости $u \approx 10$ м/с и масштабе $r \approx 1000$ км имеем $Ki \approx 0,1$. При этом сила Кориолиса уравновешивается градиентом сил давления, что объясняет давно известное метеорологам правило: если стать спиной к ветру, то область низкого давления будет слева, а высокого – справа (в южном полушарии – наоборот).

Важно то, что время τ_{ω} оказывается существенно меньше инерционного. Тогда для конвекции вращающейся жидкости можно сразу написать

$$u^2 \sim \varepsilon \tau_{\omega}, \text{ или } u \sim \sqrt{\varepsilon \tau_{\omega}}.$$

(Согласно многочисленным измерениям – в том числе и самого автора – коэффициент пропорциональности в последней формуле составляет приблизительно 1,7.) Эта формула в применении к жидкому ядру Земли дает скорости порядка 5 см/год, что вполне достаточно для возбуждения и поддержания *геомагнитного поля*. Для ураганов и тайфунов скорости получаются порядка 40–50 м/с, что соответствует наблюдениям. В последние годы конвекция с учетом вращения усиленно изучается океанографами при описании опускания вод у границ ледового покрова в высоких широтах (главного процесса в вентилиции вод глубокого океана).

В середине 1960-х годов А.М.Обухов, тогда директор Института физики атмосферы АН СССР, предложил автору посмотреть, что известно о движениях в атмосферах других планет. После нескольких лет знакомства с материалами наблюдений и первыми попытками описать отдельные черты динамики на Марсе, автор предложил теорию подобия для общей циркуляции планетных атмосфер. Эта теория давала разумные оценки скоростей ветра и вызывающей их разности температур для земной атмосферы, а именно – примерно 12 м/с и 45°, а также давала предсказания для Венеры, Марса и Титана (спутника Сатурна, у которого масса атмосферного столба в 11 раз больше, чем у Земли). Полученная формула для средней скорости ветра имела следующий нетривиальный вид:

$$u = a \sigma^{1/16} q^{7/16} c_p^{-1/4} r^{1/2} m^{-1/2},$$

где a – безразмерный множитель, для

Земли равный $a \approx 0,6$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана, входящая в формулу $q = \sigma T^4$; m – масса столба атмосферы, равная для Земли $m = 10^4$ кг/м²; $q = q_{\odot} (1 - A) / 4$ – среднее по поверхности значение плотности потока солнечной радиации, приходящей к планете, имеющей коэффициент отражения A , q_{\odot} – солнечная постоянная, для Земли $A = 0,3$ и $q_{\odot} \approx 1368 \pm 4$ Вт/м², так что $q \approx 240$ Вт/м².

Эта формула для скорости слишком сложна даже для простого обозрения. Прошло несколько лет, прежде чем автор догадался, что для полной кинетической энергии атмосферы можно записать такое выражение:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot 4\pi r^2 u^2 = 2\pi a^2 Q \tau_e \approx 2Q \tau_e,$$

где Q – полная энергия излучения Солнца, приходящая к планетному диску, а $\tau_e = r/c_e$ – отношение радиуса планеты к скорости звука, представляющее собой время затухания возмущений давления или плотности в масштабе планеты. Отношение времени τ_e к инерционному времени τ_i есть *число Маха* $Ma = u/c_e$, и, поскольку в данном случае $Ma \ll 1$, время τ_e является наименьшим.

Вообще, ветры вызываются тем, что все планеты – сферы (или близки к сферам), так что есть день и ночь, высокие и низкие широты, в результате чего различные части планеты разогреваются неравномерно, что и служит причиной ветров. Для Венеры по формуле для средней скорости получается $u \approx 1$ м/с. (Это значение подтвердилось и прямыми измерениями для нижней половины атмосферы планеты.) Для Марса теоретическая оценка скорости ветра оказалась раза в три завышенной, что впоследствии было объяснено автором тонкостью и прозрачностью его атмосферы. В таких условиях основную роль в обмене теплом между поверхностью планеты и ее атмосферой играют радиационные процессы, а не динамика.

Неожиданным (для автора) оказалось то, что по существу тот же ход рассуждений, который привел к формуле для энергии E , описывает статистику событий или объектов, а именно – определяет их число за какой-то промежуток времени в зависимости от их интенсивности.

Землетрясения

Изучим число землетрясений – сокращенно ЗТ – в масштабе всего земного шара, поскольку очень сильные ЗТ, к счастью для нас, происходят очень редко. ЗТ – очень сложный процесс и по физике, и по своей пространственной структуре. Лишь около 30 лет назад были разработаны методы более или менее точной (порядка 20%) количественной характеристики силы ЗТ по энергии излучаемых волн, принимаемых на многих станциях мировой сейсмометрической сети, существующей уже около 20 лет. Такой характеристикой является величина *сейсмического момента* $M = \mu_c S s$, где μ_c – модуль сдвига пород, разрываемых при ЗТ, S – площадь разрыва хрупкой коры, s – среднее смещение соседних блоков коры при ЗТ. Величина M измеряется в Н · м (ньютон на метр), т.е. имеет размерность работы или энергии. В процессе ЗТ высвобождается накопленное при движении литосферных плит напряжение $\Delta\sigma$. Характерно, что величина $\Delta\sigma$ несущественно меняется вокруг своего среднего значения (≈ 40 атм = 4 МПа = $4 \cdot 10^6$ Н/м² = $4 \cdot 10^6$ Дж/м³), хотя величина M при этом может различаться на много порядков. Это обстоятельство позволяет каждому ЗТ приписать свой пространственный масштаб длины L_m , площади $S_m = L_m^2$ или объема $V_m = L_m^3$:

$$L_m = \left(\frac{M}{\Delta\sigma} \right)^{1/3}, \quad S_m = \left(\frac{M}{\Delta\sigma} \right)^{2/3}, \\ V_m = \frac{M}{\Delta\sigma}.$$

Выясняется, что величины L_m и S_m являются разумной мерой длины и площади образующегося в процессе ЗТ разрыва, а знание модуля сдвига позволяет определить и среднее смещение s . Так, при сильнейшем в нашем веке ЗТ (май 1960 г., Чили) длина разрыва коры достигала 800 км, а смещение было более 20 м!

Из соображений размерностей можно записать

$$M = a_s P \tau (\geq M),$$

где a_s – постоянный множитель, P – вводимая в систему мощность (в нашем случае глобальной статистики это полное значение геотермической мощности $P = 4 \cdot 10^{13}$ Вт при среднем значении потока $0,08$ Вт/м²), а