

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУТОЧНОГО ВРАЩЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложена численная модель, описывающая влияние скорости вращения Земли вокруг своей оси на температуру поверхности суши при отсутствии атмосферы. В основе модели – конечно-разностный метод решения уравнения теплового баланса. Учитывались прямая солнечная радиация и тепловое излучение, теплообменом между соседними участками поверхности пренебрегалось. Путем численных экспериментов с моделью показано, что средняя температура поверхности уменьшается при уменьшении скорости вращения и теплоемкости подстилающей поверхности. Приведен рассчитанный суточный ход температуры в случае песка и базальта.

В последние десятилетия существенно возрос интерес к климатической тематике в связи со значительным изменением глобального климата и беспрецедентными изменениями в региональных климатических условиях. В связи с этим ставятся задачи прогноза последствий усиливающегося парникового эффекта в текущем столетии. Традиционный подход состоит в использовании моделей общей циркуляции, описывающих пространственно-временную изменчивость параметров состояния атмосферы на основе решения системы уравнений термогидродинамики. Однако, несмотря на несомненные успехи в этой области климатологии, достигнутую на сегодняшний день адекватность глобальных моделей нельзя признать удовлетворительной. По оценкам [1] даже среднемесячные температуры воздуха над сушей северного полушария, осредненные за 20 лет, воспроизводятся современными моделями со среднеквадратичной погрешностью от 2,4 до 5,7°C. Причем в этих моделях температура поверхности океана задается по данным измерений, а не рассчитывается с помощью модели. По заключению межправительственной комиссии по изменению климата (IPPC-3) при уровне доверия 90 % доверительный интервал повышения среднеглобальной температуры приземного воздуха к 2100 г. составляет 1,4–5,8°C. Таким образом, ожидаемый эффект укладывается всего лишь в одно среднеквадратичное отклонение по точности расчета. В связи с этим актуальной является задача совершенствования отдельных блоков региональных моделей с целью изучения роли различных климатообразующих факторов. В данной работе рассмотрено моделирование суточного хода температуры отдельного участка поверхности планеты в зависимости от составляющих радиационного баланса и скорости суточного вращения вокруг своей оси.

Обычно вращение Земли рассматривается как фактор, непосредственно влияющий на массообмен в атмосфере и океане вследствие действия силы Кориолиса и закона сохранения момента импульса [2]. Однако суточное вращение оказывает существенное влияние и на радиационный режим даже при полном отсутствии атмосферы и гидросферы. Действительно, если планета вращается достаточно быстро, то ее поверхность в низких широтах можно аппроксимировать боковой поверхностью цилиндра, которая равномерно прогревается солнечными лучами и соответствующая температура определяется из условия радиационного баланса:

$$T^4 = S / (\pi \cdot \sigma), \quad (1)$$

где T – температура освещенной поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана и S – солнечная постоянная. В то же время, при отсутствии вращения вокруг своей оси радиационный баланс поверхности зависит от часового (азимутального) угла φ , отсчитываемого от направления на Солнце:

$$T^4 = S \cos \varphi / \sigma, \quad (2)$$

то есть хотя температура освещенной части поверхности больше, но средняя температура поверхности понижается. Действительно, в первом случае $T_{cp} = (S / (\sigma \pi))^{1/4}$, а во втором $T_{cp} = 0,43 (S / \sigma)^{1/4}$.

Для исследования этого эффекта в общем случае рассматривалась вращающаяся с угловой скоростью ω сфера радиуса R , на поверхности которой из условия радиационного баланса рассчитывалось установившееся распределение температуры при заданном склонении Солнца γ . При этом учитывалась динамика поступления на выделенный участок поверхности прямой солнечной радиации и его теплового излучения, связанная с суточным ходом угла падения солнечных лучей и мгновенной температуры поверхности. Боковым теплообменом между соседними участками поверхности пренебрегалось, толщина слоя суточного прогрева считалась везде одинаковой. Установившийся квазипериодический режим изменения температуры поверхности в точке с произвольными координатами (широтой и долготой) рассчитывался конечно-разностным методом. На каждом шаге по времени исходя из текущего значения высоты Солнца над горизонтом β рассчитывались потоки прямой солнечной радиации F_1 и теплового излучения поверхности F_2 :

$$F_1 = S \sin \beta, \quad (3)$$

$$F_2 = \sigma T^4. \quad (4)$$

Задача решалась в сферической системе координат с началом координат в центре земного шара (рисунок 1). При расчетах использовался тот факт, что $\sin \beta = -\cos \alpha$, где α – угол между единичным вектором, направление которого совпадает с направлением солнечных лучей, и радиус-вектором, направленным к рассматриваемому участку поверхности Земли. В свою очередь, $\cos \alpha$ определялся по значению скалярного произведения этих векторов, при этом компоненты радиус-вектора в декартовых координатах рассчитывались как:

$$r_x = \sin \theta \cos \varphi, \quad (5)$$

$$r_z = \cos \theta, \quad (6)$$

где θ и φ – полярный и азимутальный углы соответственно, причем $\varphi = \omega t$ и t – время, отсчитываемое от истинного полдня в данном месте. Учитывалось, также, что вектор направленности солнечных лучей лежит в плоскости xz и его компоненты по осям x и z равны $-\cos \gamma$ и $-\sin \gamma$ соответственно. Альбедо поверхности принималось равным нулю, поэтому радиационный баланс определялся разностью двух потоков

$$B = F_1 - F_2, \quad (7)$$

а изменение температуры поверхности за время Δt :

$$\Delta T = B \cdot \Delta t / C \rho h, \quad (8)$$

где h – толщина слоя дневного прогрева, C – теплоемкость грунта, ρ – его плотность. В ходе численных экспериментов значения ω , γ , ρ , C и h варьировались. Таким образом, в качестве подстилающей поверхности задавались слои песка, глины и базальта разной толщины. В зависимости от теплоемкости грунта, задаваемой толщины h слоя дневного прогрева, широты места и времени года (оно определялось значением γ) суточный ход температуры поверхности устанавливался через несколько недель или месяцев. Шаг по времени брался 1 час. На рисунке 2 приведена установившаяся суточная изменчивость температуры песка на широте 45° с.ш. в июне при $h = 10$ см и современной скорости вращения Земли. Экстремально большая суточная амплитуда температуры в этом случае связана с отсутствием атмосферы в модельной постановке задачи.

После выхода на установившийся режим рассчитывалась также мгновенная среднеширотная температура и среднеглобальная температура поверхности. Последняя существенно зависела от теплоемкости единицы объема подстилающей поверхности, с ростом которой она возрастала. Так, если для приведенного на рисунке 2 случая она составляла 267 К, то, например, для базальта средняя температура поверхности получалась на 23 К больше. Не менее сильная зависимость была обнаружена в ходе численных экспериментов и от скорости вращения планеты вокруг своей оси.

Рассматривалась так называемая “белая Земля” [3], то есть предполагалось полное обледенение планеты включая океаны. Даже при скорости вращения Земли вдвое меньше современной среднеглобальная температура поверхности в этом случае заметно выше 273 К. Таким образом, в рассматриваемом приближении полное обледенение Земли невозможно. Рассчитывалось также установившееся распределение температуры на поверхности планеты, полностью покрытой базальтом, что соответствует начальному этапу развития Земли. На рисунке 3 приведены результаты расчетов для двух значений ω : современной и вдвое меньшей. Широта и склонение Солнца задавались те же, что и на рисунке 2. Соответствующие среднеглобальные значения температуры поверхности базальта равны 289,8 К и 278,8 К. В то же время, при вдвое большей по сравнению с современной скорости вращения, это значение равно 293,8 К. Таким образом, замедление вращения Земли вдвое ведет к похолоданию в среднем на 12 градусов, тогда как ускоренное вращение приведет к второму меньшему потеплению (на 4 градуса).

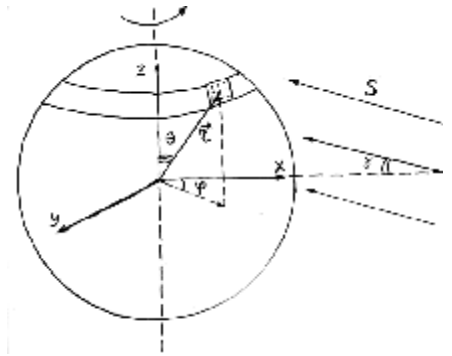


Рисунок 1 – Схема расположения участка поверхности, использованная в модели

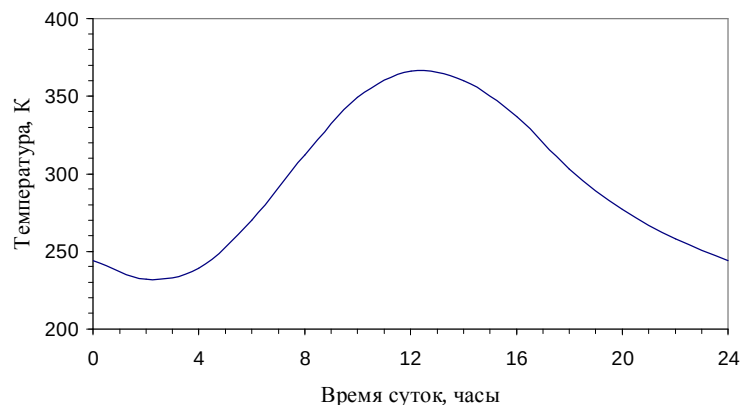


Рисунок 2 – Рассчитанный по модели суточный ход температуры песка

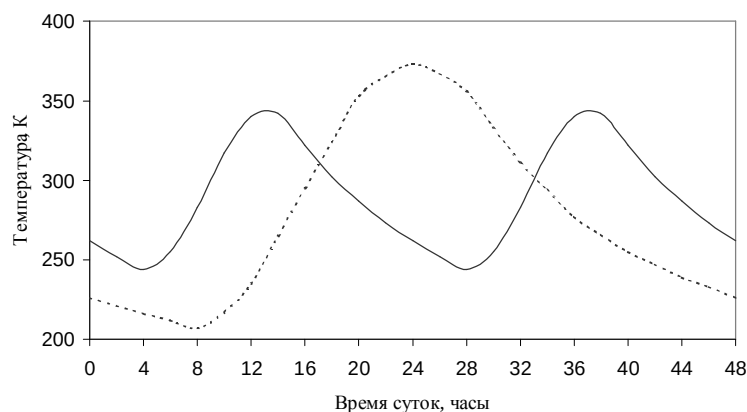


Рисунок 3 – Рассчитанный суточный ход температуры базальта
(пунктир соответствует уменьшению угловой скорости вращения в два раза)

В качестве подстилающей поверхности рассматривался, также тонкий слой воды, который равномерно прогревался вследствие вертикального перемешивания. Увеличение толщины слоя соответствовало увеличению теплоемкости подстилающей поверхности и тоже вело к повышению средней температуры. Как показали последующие расчеты с более сложной моделью, в которой учитывались затраты тепла на испарение и теплообмен с нижележащими слоями, эффект увеличения среднесуточной температуры с ростом толщины деятельного слоя сохраняется и в этом случае. Это особенно заметно при увеличении толщины слоя от 1 до 20 см – на широте Крыма летом эффект по расчетам достигает 4 К. Таким образом, даже в такой относительно простой постановке задачи удастся правильно воспроизвести основные особенности влияния суточного вращения на температуру поверхности планеты.

Библиографический список

1. Рубинштейн К.Г. Воспроизведение приземной температуры воздуха и ее использование / К.Г. Рубинштейн, В.В. Оганесян, Н.В. Грачев // Метеорология и гидрология. — М., 2004. — № 12. — С. 42–51.
2. Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли / Н.С. Сидоренков // Вестн. — М., 2004. — Т. 74. — № 8. — С. 701–715.
3. Baum S.K. GSM response to late precambrian (~590 Ma) ice / S.K. Baum, T.J. Crowley // Geophysical research Letters. — 2001. — V. 28. — № 4. — P. 583–586.

Поступила в редакцию 10.05.2005 г.