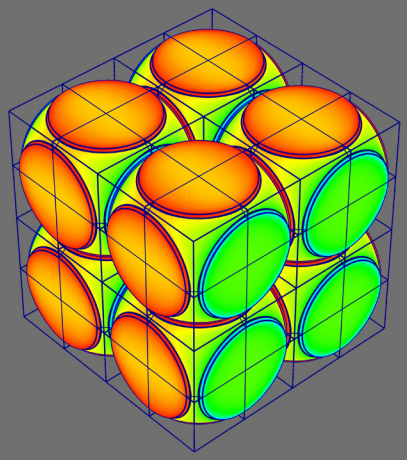
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Пархоменко В.П. Моделирование климатических последствий падения крупного астероида 66 млн лет назад. Математическое моделирование и численные методы, 2019, № 2, с. 68–83.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/195/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.38
05.03.2026 13:19:38

УДК 551.513

Моделирование климатических последствий падения крупного астероида 66 млн лет назад

© В.П. Пархоменко[1,2]

[1]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН
Москва, 119333, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследования указывают на массовую гибель на Земле значительного количества биологических групп, в частности - динозавров, в конце мелового периода 66 миллионов лет назад. Окончательная причина этого явления остается предметом обсуждения. В настоящее время существуют две основные теории: крупномасштабные извержения вулканов и воздействие астероида, образовавшее кратер Чиксулуб (Мексика). Производство серосодержащих газов из испарений поверхностных слоев Земли при соударении сейчас считается основным источником климатических эффектов, поскольку они образуют стратосферные сульфатные аэрозоли, которые блокируют солнечный свет и таким образом охлаждают атмосферу Земли и препятствуют фотосинтезу. В настоящей работе представлено применение совместной модели климата для изучения эффектов воздействия этого астероида на климат Земли. Установлено, что в зависимости от времени пребывания в стратосфере аэрозоля, глобальная годовая средняя температура приземного воздуха уменьшалась, на 18°C–26°C, оставалась ниже нуля в течение 4–30 лет и наблюдалось время восстановления более 30 лет.

Ключевые слова: *климатическая модель, палеоклимат, Чиксулуб*

Введение. На границе мела-палеогена массовой гибели подверглось значительное количество биологических групп животных, в том числе крупных (не летающих) динозавров, других позвоночных, морских рептилий, беспозвоночных, некоторых видов планктона. Серьезность этого события, недавно датированного 66.043 ± 0.043 млн лет назад [1], и тот факт, что оно отмечает гибель динозавров, объясняет постоянный интерес к пониманию его происхождения. Тем не менее, окончательная причина вымирания остается предметом обсуждения. В настоящее время большинство исследований сосредоточено на двух теориях, основанных на событиях, примерно совпадающих с исчезновением. С одной стороны, в это время произошли крупномасштабные извержения вулканов, причем основная фаза извержений длилась с 66,3 до 65,5 млн лет назад [2]. Эти извержения высвободили диоксид серы и углекислый газ, что привело к климатическим изменениям, которые могли вызвать массовое вымирание. С другой стороны, воздействие астероида, образовавшее кратер Чиксулуб (Мексика), датированное совпадением с событием исчезновения в пределах ошибок [1], привело к резким локальным и кратковременным последствиям, а

также произвело большое количество пыли, сульфатных аэрозолей и парниковых газов, которые повлияли на климат глобально и на более длительные сроки [3]. В дополнение к датированию геологических и палеонтологических записей, модельные исследования изменений окружающей среды, связанные с этими событиями, могут помочь оценить конкурирующие теории [4]. В этой статье мы используем совместную модель климата для изучения эффектов воздействия этого астероида на климат Земли.

Первоначальная гипотеза воздействия предполагала, что частицы пыли, образующиеся во время удара, ответственны за прекращение фотосинтеза после удара [5]. Первые исследования, изучающие изменения климата, связанные с воздействием астероида, в основном были сосредоточены на этих эффектах (например, [6]). Однако более поздние исследования обломков в ударном слое свидетельствуют о том, что доля субмикронных частиц пыли в стратосфере была слишком мала, чтобы вызвать наблюдаемые изменения окружающей среды [7]. Вместо этого производство серосодержащих газов из испарений мишени при соударении считается основным источником климатических эффектов, поскольку они образуют стратосферные сульфатные аэрозоли, которые блокируют солнечный свет и таким образом охлаждают атмосферу Земли и препятствуют фотосинтезу [8]. В немногих существующих исследованиях, посвященных эффекту аэрозолей, использовались неполные климатические модели [9] и были ограничены короткими периодами после воздействия, не исследуя долгосрочные изменения.

Исследование сосредоточено на глобальных и долгосрочных изменениях и не рассматриваются локальные и краткосрочные явления, такие как экстремальная жара, сильные ветры, и цунами, близкие к месту воздействия [3].

Мы получили сильное продолжительное охлаждение, предполагая важную роль соударения в массовом вымирании. В зависимости от времени пребывания в стратосфере аэрозоля, глобальная годовая средняя температура приземного воздуха уменьшалась, по меньшей мере, на 26° C, за период от 3 до 16 лет и временем восстановления более 30 лет. Поверхностное охлаждение вызвало энергичное перемешивание океана, и изменение меридиональной вертикальной циркуляции океана. Эти сильные изменения окружающей среды предполагают ключевую роль падения астероида в гибели динозавров в конце мелового периода.

Постановка задачи и результаты моделирования климата до и после падения астероида. Математическое и численное моделирование является мощным инструментом для исследования климатической

системы и прогнозирования изменений климата. Современное моделирование осуществляется с помощью мощных программных средств, в том числе отечественных, например, для решения задач нестационарной газодинамики многокомпонентного газа различными численными методами [10–13]. Здесь мы используем совместную гидродинамическую трехмерную глобальную модель климата [14, 15], состоящую из модели Мирового океана в геострофическом приближении с учетом фрикционного члена в уравнениях импульса по горизонтали, энерго – влагобалансовой модели атмосферы и термодинамической модели морского льда для изучения климатических эффектов сульфатных аэрозолей и CO_2 после падения астероида.

Значения температуры T и солености S воды удовлетворяют адвекционно-диффузионным уравнениям, что позволяет описать термохалинную циркуляцию океана. Приближенным образом учитываются также конвективные процессы [14, 15].

Система основных уравнений модели океана в безразмерной форме, записанных в сферических координатах (ϕ, s, z), где ϕ — долгота, $s = \sin\theta$, θ — широта и z — высота, направленная вверх, имеет следующий вид [14]:

уравнения импульса по горизонтали

$$-sv = -\frac{1}{c}\frac{\partial p}{\partial \phi} - \lambda u + \frac{\partial}{\partial z}\tau^{\phi}$$

$$su = -c\frac{\partial p}{\partial s} - \lambda v + \frac{\partial}{\partial z}\tau^{s},$$

уравнение гидростатики

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho,$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\frac{u}{c}\right) + \frac{\partial}{\partial s}(vc) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

уравнение состояния морской воды

$$\rho = \rho(S, T),$$

уравнения переноса и диффузии температуры и солености записываются единым образом для величины X

$$\frac{d}{dt}X = \kappa_h \nabla^2 X + \frac{\partial}{\partial z}\left(\kappa_v \frac{\partial X}{\partial z}\right) + C,$$

где u, v, w — компоненты вектора скорости, λ — переменный в пространстве фрикционный член, увеличивающийся к береговым границам и экватору, $c = \cos\theta$, T, S, p — температура, соленость, давление соответственно; $\vec{\tau} = \left(\tau^{\phi}, \tau^{s}\right)$ — безразмерное напряжение трения ветра; ρ — плотность воды; ρ_0 — ее характерное значение; κ_v, κ_h — коэффициенты турбулентной диффузии трассеров по вертикали и горизонтали соответственно.

Характерный масштаб для расстояния по горизонтали определяется радиусом Земли r_0, и по вертикали — максимальной глубиной океана D. Горизонтальные компоненты скорости (u, v) в направлениях (ϕ, s) выражаются через характерную скорость U_0, а вертикальная компонента w — через $U_0 D / r_0$. Характерные масштабы для давления p и плотности ρ получаются из геострофических и гидростатического соотношений, соответственно. Следовательно, градиент плотности $G = \partial\rho / \partial z$ выражается через $\rho_0 f U_0 r_0 / g D^2$, где f — удвоенная угловая скорость суточного вращения Земли. Характерное время определяется выражением r_0 / U_0. Величина d/dt в последнем уравнении — материальная (полная) производная. Масштабные множители для T и S не используются. Величина C определяется из процедуры конвективного приспособления для устранения статической неустойчивости с учетом консервативности T и S. Уравнение состояния для размерной плотности ρ_* имеет вид

$$\rho_* = 1000 + 0,7968\,S - 0,0559\,T - 0,0063\,T^2 + 3,7315 \cdot 10^{-5}\,T^3$$

Условие отсутствия нормального потока требуется на всех границах. На границах материков также принимаются равными нулю нормальные составляющие потоков тепла и солей. Океан подвергается воздействию напряжения трения ветра τ на поверхности. Потоки T и S у дна полагаются равными нулю, а на поверхности определяются взаимодействием с атмосферой. Поверхностный температурный поток F_T связан с поверхностным тепловым потоком Q_θ соотношением $Q_\theta = \rho_0 C_{p0} F_T$, где C_{p0} — удельная теплоемкость морской воды.

Уравнения дискретизируются на конечно-разностной сетке Аракавы [14, 15] с использованием простых центральных разностей по пространству для диффузии и схемой с весами вверх по потоку для адвекции. Простые явные конечные разности по времени обеспечивают требуемую точность, и, хотя шаг по времени численно ограничен, являются более эффективными, чем центральные разности по вре-

мени с большим шагом по времени. Неявный алгоритм [14] также может быть использован в программе, но для стандартных параметров он является менее эффективным. На каждом шаге по времени поле скоростей определяется диагностически из поля плотностей.

Вертикальные уровни модели равномерно распределены в логарифмических координатах $\varsigma = \log(1 - z + 0.1)$ так, что верхние слои тоньше, чем нижние. Горизонтальная сетка является равномерной в (ϕ, s) координатах (долгота и синус широты), определяя при этом ячейки одинаковой площади в пространстве. В настоящей модели используется 8 вертикальных уровней для плотности. Максимальная глубина принимается равной 5 км.

Для описания процессов, протекающих в атмосфере, используется энерго- и влаго-балансовая модель или модель общей циркуляции атмосферы. Для первой из них прогностическими переменными являются температура воздуха T_a и удельная влажность q_a на подстилающей поверхности. В модели решается вертикально проинтегрированное уравнение для T_a, определяющее баланс приходящего и уходящего радиационных потоков, явных (турбулентных) обменов потоками тепла с подстилающей поверхностью, высвобождения скрытого тепла из-за осадков и простой однослойной параметризации горизонтальных процессов переноса. Источники в уравнении переноса для удельной влажности q_a определяются осадками, испарением и сублимацией с подстилающей поверхности. Уравнения для баланса тепла и влаги атмосферы (на единицу площади) имеют следующий вид:

$$\rho_a h_t C_{pa} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + \beta_T \nabla(\mathrm{u} T_a) - \nabla(\nu \nabla T_a) \right) = Q_{ta}$$

$$\rho_a h_q \left(\frac{\partial q_a}{\partial t} + \beta_q \nabla(\mathrm{u} q_a) - \nabla(\kappa \nabla q_a) \right) = \rho_0 (E - P),$$

где h_t и h_q — толщины атмосферных пограничных слоев для температуры (8,4 км) и влажности (1,8 км) соответственно, ν и κ — коэффициенты турбулентной диффузии для температуры и влажности соответственно, Q_{ta} — суммарный поток тепла в атмосферу, E - скорость испарения или сублимации, P — скорость выпадения осадков, ρ_a и ρ_0 — плотность воздуха и воды. C_{pa} — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Параметры β_T и β_q являются масштабными множителями для оценки вклада адвективного переноса. Они могут быть необходимы вследствие однослойного представления

атмосферы, особенно если при счете используются данные о поверхностных скоростях вместо вертикально осредненных данных. Здесь принято $\beta_T = 0$ и $\beta_q = 0.4$ или 0.

Численные эксперименты основаны на моделировании климатического состояния конца мелового периода с использованием конфигурации континентов (рис. 1) 66 млн лет назад [16].

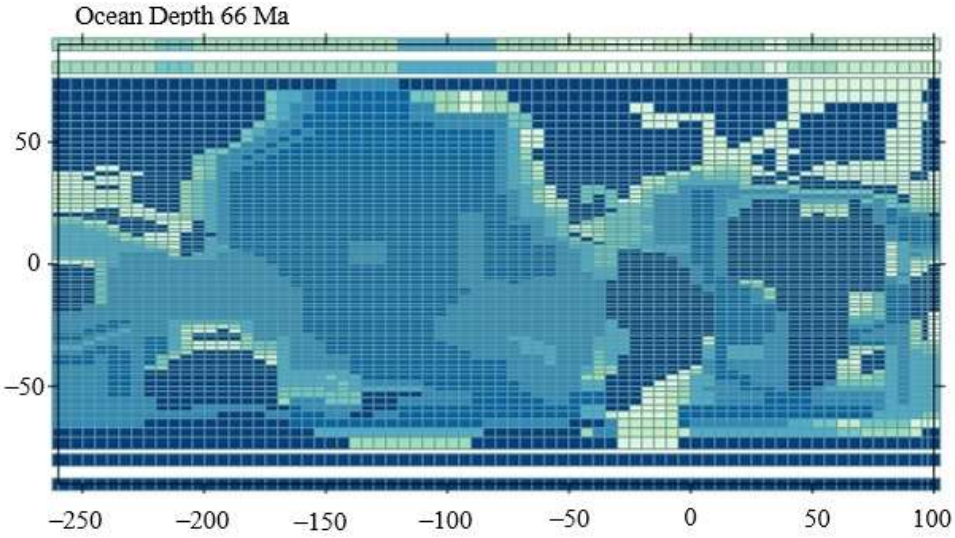


Рис. 1. Распределение континентов и глубин океана (выделены различными цветами) 66 млн лет назад

Постановка задачи и результаты моделирования климата до и после падения астероида. Солнечная постоянная принимается равной 1354 Вт/м^2, исходя из сегодняшней солнечной постоянной 1361 Вт/м^2. Орбитальные параметры определяются круговой орбитой и наклоном эклиптики 23.5°. Оценки концентрации CO_2 в атмосфере составляют от 500 до 1500 ppm для позднего мела [17]. В течение периода, непосредственно предшествующего удару, были, вероятно, ниже 800 ppm [18]. Поэтому мы провели базовое моделирование с концентрацией 500 ppm атмосферного CO_2 и эксперимент с чувствительностью при более высокой концентрации CO_2 1000 ppm. Расчеты до падения астероида проводились в течение примерно 2000 модельных лет, пока не будет достигнуто климатическое равновесие. Рассчитанная глобальная среднегодовая температура поверхностного слоя воздуха толщиной 8000 м в конце мелового периода составляет 15,5° С или примерно на 4° С выше доиндустриальных температур для моделирования 500 ppm и 21,6° С или примерно на 7° С выше, чем доиндустриальный климат для модельного эксперимента с 1000 ppm.

При моделировании климатических воздействий падения астероида мы используем результаты геофизического моделирования соударения. Они указывают, что для области падения глубиной 2,9 км, состоящей из 30% испарившегося вещества и 70% насыщенных водой, образуется масса серы 100 Гт [8]. Для сравнения, это соответствует примерно в 10 000 раз большему количеству высвобожденной серы во время извержения Пинатубо 1991 года. Результаты не сильно зависят от точного количества серы, выделяемого во время удара, поскольку радиационное воздействие не увеличивается для массы серы более 30 Гт [9]. Учитываются только аэрозоли в стратосфере, поскольку аэрозоли быстро вымываются, как только они попадают в тропосферу. Время пребывания стратосферных трассеров в современной установившейся атмосфере составляет около 2 лет. Мы следуем [9] и предполагаем возможное более длительное время пребывания аэрозоля в возмущенной атмосфере после соударения. При такой постановке задачи солнечный поток на поверхности резко уменьшается сразу после удара от значения до удара 169,5 Вт/м^2 до минимального значения 2,28 Вт/м^2 , которое сохраняется неизменным в течение 3-х месяцев, 1 года или 2-х лет для различных вариантов расчетов. Затем происходит уменьшение концентрации аэрозоля. Характерное время осаждения аэрозоля составляет 3, 5 и 10 лет для разных вариантов расчетов.

Время пребывания в стратосфере не сильно влияет на минимум солнечного излучения, а скорее определяет время, необходимое для восстановления значения до воздействия, которое достигается через 6, 10 и 20 лет для различного времени осаждения, соответственно. В дополнение к эффекту влияния сульфатных аэрозолей мы рассматриваем повышенную концентрацию CO_2 в результате падения. Для массы серы 100 Гт, около 1400 Гт углекислого газа инжектируется в атмосферу [8], что соответствует увеличению концентрации CO_2 в атмосфере на 180 ppm. Кроме того, могут быть дополнительные выбросы CO_2 в результате дегазации океана и возмущений наземной биосферы, поэтому мы проводим дополнительные эксперименты по моделированию с содержанием CO_2 500 ppm, 800 ppm и 1200 ppm в качестве экспериментов по чувствительности. Предполагается, что как сульфатные аэрозоли, так и CO_2, образующиеся во время удара, распределяются глобально и равномерно в наших численных экспериментах. Равномерное распределение аэрозолей является упрощенным, но может быть разумным приближением, учитывая величину и местоположение падения Чиксулуб. Мы предполагаем, что более кратковременные пылевые эффекты перекрываются эффектом аэрозоля. Кроме того, мы пренебрегаем водяным паром, поскольку полученное количество является неопределенным, а его время пребывания в тропосфере очень мало. Все эксперименты с падением астероида выполняются для конца

мелового климатического периода с 500 ppm и 1000 ppm атмосферного CO_2 и интегрируются в течение 100 лет после воздействия.

Основным результатом климатического моделирования является сильное и постоянное глобальное охлаждение в течение десятилетий после воздействия. На рис. 2 показана глобальная годовая средняя температура приземного воздуха в течение 30 лет после падения для концентрации CO_2 в атмосфере 500 ppm перед ударом, для разных времен пребывания и осаждения аэрозоля и для разных значений выбросов CO_2 в результате падения.

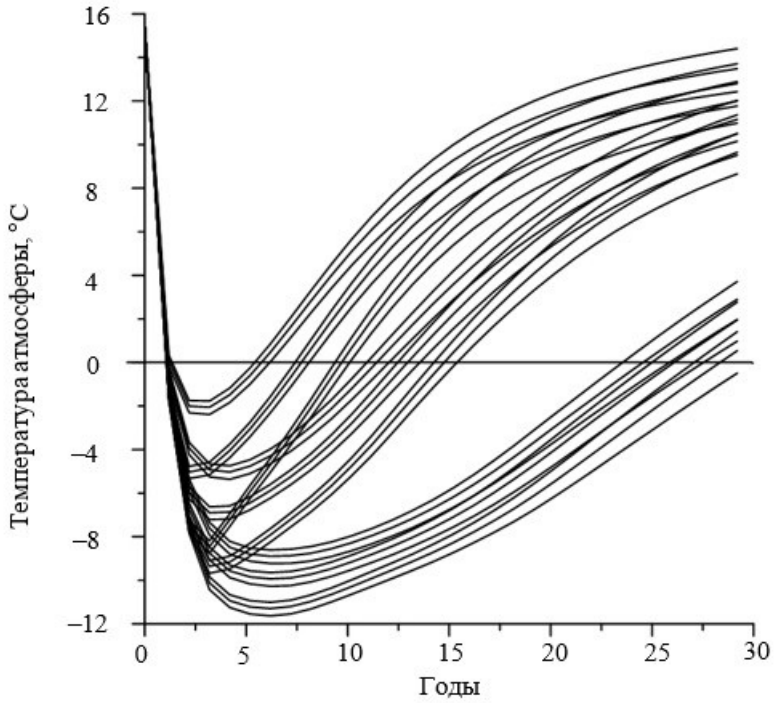


Рис. 2. Глобальная годовая средняя температура приземного воздуха в течение 30 лет после падения для разных времен пребывания и осаждения аэрозоля и для разных значений выбросов CO_2

Изменения температуры для различных эмиссий двуокиси углерода, вызванных падением, слабо зависят от ее величины. Далее основное внимание будет уделено моделированию, представляющему собой промежуточную эмиссию 360 ppm. Для значения времени осаждения 3 года в стратосфере, которое является наиболее консервативным предположением для моделирования, глобальная среднегодовая температура приземного воздуха снижается на 27° С, при этом минимальная температура достигается на 3-м году после удара. Эта разница температур не чувствительна к концентрации CO_2 до воздействия: в

случае концентрации до 1000 ppm температура падает до почти одинакового значения от + 22ºС до -5.0ºС. Глобальная среднегодовая температура поверхностного воздуха остается ниже нуля в течение 5 лет. Для времени осаждения 5 лет и 10 лет минимальная глобальная среднегодовая температура поверхностного воздуха еще ниже (охлаждение на 30° С и 34° С, соответственно) и достигается позднее (на 4-ый и 7-ой годы, соответственно). В этих расчетах с более длительным временем пребывания глобальные среднегодовые температуры замерзания сохраняются в течение 11 лет и 25 лет, соответственно. В дальнейшем мы сосредоточимся на вариантах с временем пребывания аэрозолей в стратосфере в течение трех лет, представляющих наиболее консервативный случай. Охлаждение после удара, наблюдаемое в наших расчетах, сопровождается заметным расширением площади снега и морского льда. Среднее альбедо поверхности увеличивается с 0,13 до воздействия до 0,25 в году с максимальным ледяным покровом в нашем стандартном моделировании (500 ppm CO_2, предшествующих удару, время осаждения 3 года, 360 ppm CO_2 в результате воздействия). На рис. 3 показана временная эволюция глобальной площади морского льда в течение трех десятилетий после воздействия.

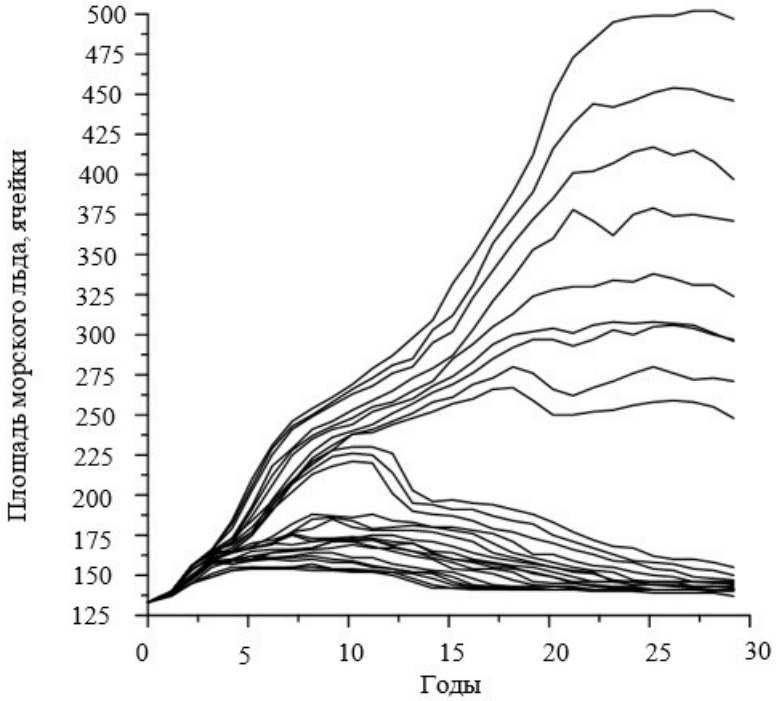


Рис. 3. Эволюция глобальной площади морского льда в течение трех десятилетий после воздействия для разных времен пребывания и осаждения аэрозоля и для разных значений выбросов CO_2

Для времени осаждения стратосферного аэрозоля 3 года площадь морского льда возрастает на 30 %, а затем уменьшается до первоначального значения. Для времени осаждения 10 лет площадь морского льда резко возрастает после начального периода охлаждения (максимально в 4 раза примерно через 25 лет), что указывает на начало процесса, вызванного положительной обратной связью лед-альбедо. Однако этот процесс в конечном итоге замедляется и обращается вспять с увеличением солнечной радиации. Это также означает, что возмущение с еще более продолжительным временем пребывания может быть достаточным для запуска процесса «белой Земли». Отметим, что выброс CO_2 от удара приведет к потеплению по сравнению с состоянием до удара после начального периода охлаждения. В зависимости от количества CO_2, испускаемого ударом, после 1000 лет климат на 1.0 – 2.6ºC теплее, чем до удара, для начальной концентрации CO_2 500 ppm и на 0,5 – 1,4ºC теплее для 1000 ppm.

В табл. 1 суммированы результаты расчетов для всех вариантов расчетов.

Таблица 1

Результаты расчетов для всех вариантов постановки задачи

Время осаждения аэрозоля (годы)	Момент достижения min температуры (годы)	Минимум температуры (C^o)	Момент достижения max морского льда (годы)	Максимум площади морского льда (ячейки)
10	6 -7	от -8,7 до -11,6	23 - 28	260 - 500
5	3 - 4	от -4,4 до -9,7	9 - 12	170 - 230
3	2 - 3	от -1,9 до -8,8	5 - 9	155 -173

Региональные температурные изменения, вызванные воздействием астероида, еще более серьезны, чем глобальные средние значения. Карты температуры приземного воздуха до удара и года минимальной глобальной среднегодовой температуры указывают на выраженное региональное охлаждение, в частности, в континентальных и полярных регионах. На рис. 4 представлено распределение этой температуры для 500 ppm CO_2, предшествующих падению, а Рис. 5 - после падения для времени осаждения в стратосфере 3 года и 360 ppm CO_2 для января месяца.

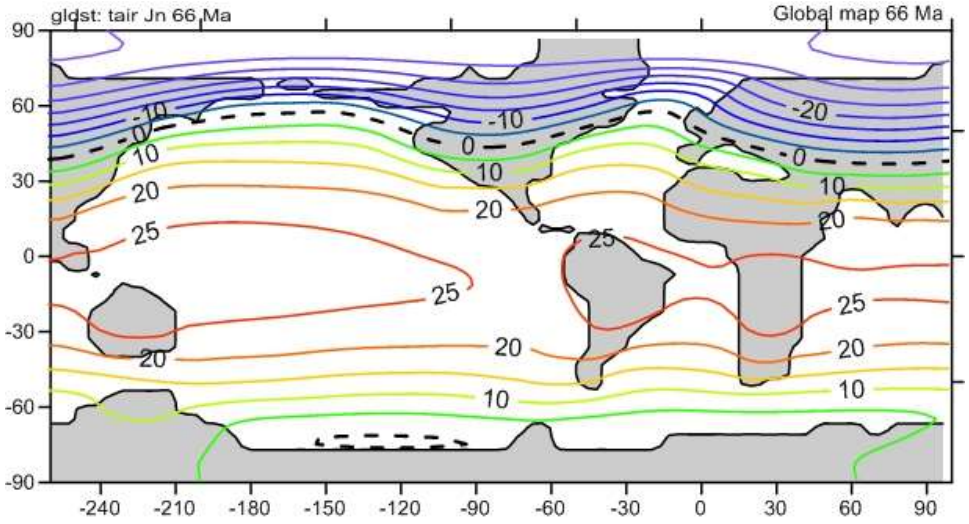


Рис. 4. Распределение температуры приземного воздуха до падения астероида, для 500 ppm CO_2

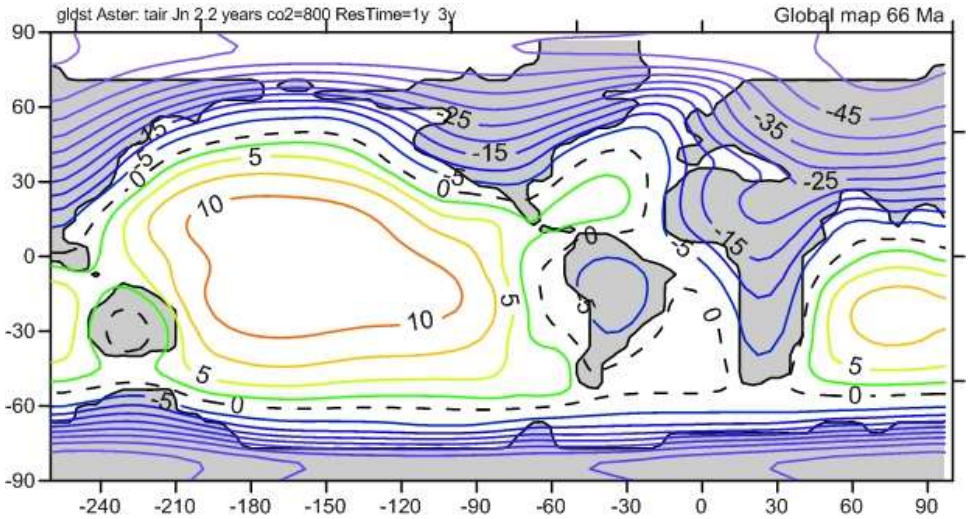


Рис. 5. Распределение температуры приземного воздуха после падения астероида, для 500 ppm CO

Из-за тепловой инерции океана изменения температуры поверхности распространяются медленно в глубокий океан. Поэтому интересно исследовать долгосрочные температурные изменения в глубоком океане. На рис. 6 показаны меридиональные профили изменения температуры Тихого океана в течение двух интервалов времени.

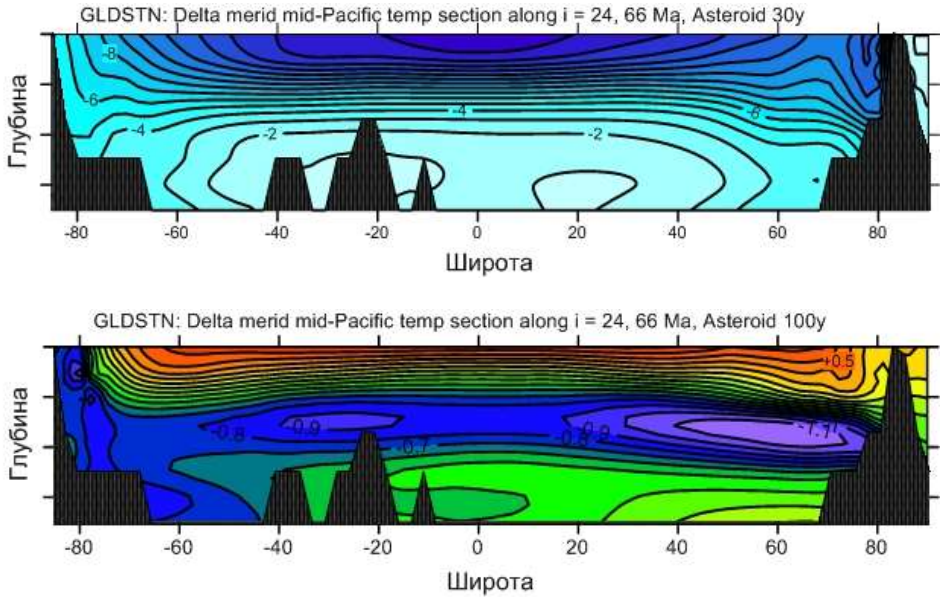


Рис. 6. Меридиональные профили изменения температуры Тихого океана через 30 лет (вверху) и через 100 лет (внизу) после падения астероида

На 30-м году после удара сильное поверхностное охлаждение приводит к очень холодным водным массам в верхних 1000 м на всех широтах и вплоть до дна океана в высоких широтах. Спустя 100 лет после падения в приповерхностных слоях океана проявляются признаки потепления из-за выброса CO_2 после удара, в то время как массы холодной воды достигают больших глубин с явным охлаждением в глубоком океане на высоких широтах.

Выводы. Сопоставимые исследования в области моделирования с учетом эффекта аэрозолей и с использованием совместных моделей климата проведено в [19, 20] и соответствуют результатам, приведенным здесь. Что касается геологических и палео-данных, то трудно сравнивать охлаждение, обнаруженное в наших расчетах, потому что для записи быстрых климатических изменений, связанных с воздействием, требуется очень высокое временное разрешение. Однако два недавних исследования [21, 22] оценивают температуры в тропической области перед ударом 30–31°C, что хорошо согласуется с тропической температурой морской поверхности позднего мела. Годовая средняя температура поверхности моря в этой области в нашем моделировании несколько ниже и равна 25°C до удара. В работе [21] сообщается о снижении температуры морской поверхности в Мексиканском заливе до 7°C, продолжающейся в течение нескольких месяцев и десятилетий, но не более 100 лет, что хорошо согласуется с нашими расчетами. В работе [21] также сообщается об увеличении температур

океана на 1–2°C после ударного охлаждения, что согласуется с потеплением, наблюдаемым в наших симуляциях, из-за дополнительного CO_2, выделяемого из удара. Однако следует иметь в виду, что подробное сравнение локальных данных затруднено сравнительно грубым пространственным разрешением нашей модели, а также неопределенностями относительно временного разрешения.

Таким образом, наше исследование климатического моделирования демонстрирует сильное охлаждение и энергичное перемешивание океана в результате падения Чиксулуб. Эти результаты в общем согласуются с палео данными, но детальное сравнение затруднено временным разрешением эмпирических записей, вопросами калибровки температуры и низким пространственным разрешением нашей модели. Хотя из результатов нашей модели нельзя сделать вывод, что воздействие было исключительно ответственным за массовое вымирание в конце мелового периода, резкое снижение температуры и ожидаемое глубокое возмущение морской биосферы из-за изменения циркуляции океана в наших расчетах, безусловно, определяет ключевую роль падения на событие исчезновения. Влияние Чиксулуб и вулканизм этого периода также могли бы действовать сообща, конечно, либо из-за воздействия, вызвавшего более интенсивные извержения, как недавно утверждалось [22], либо путем полного уничтожения биосферы, вызванным влиянием извержений [1]. В будущих исследованиях необходимо будет более подробно изучить взаимодействие между этими двумя причинами, а также влияние на морскую и наземную биосферу Земли.

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФИ №17-01-00693.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Renne P.R., Deino A.L., Hilgen F.J., Kuiper K.F., Mark D.F., Mitchell W.S., Morgan L.E., Mundil R., Smit J. Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 2013, vol. 339, iss. 6120, pp. 684–687.

[2] Schoene B., Samperton K.M., Eddy M.P., Keller G., Adatte T., Bowring S.A., Khadri S.F.R., Gertsch B. U-Pb geochronology of the Deccan Traps and relation to the end-Cretaceous mass extinction, *Science*, 2015, vol. 347, iss. 6218, pp. 182–184.

[3] Kring, D.A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.,* 2007, no. 255 (1-2), pp. 4–21.

[4] Feulner G. Climate-modelling of mass-extinction events: a review. *Int. J. Astrobiol.*, 2009, no. 8, pp. 207–212.

[5] Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 1980, vol. 208, iss. 4448, pp.1095–1108.

[6] Covey C., Thompson S.L., Weissman P.R., MacCracken M.C. Global climatic effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. *Globa Planet. Change*, 1994, no. 9 (3-4), pp. 263–273.

[7] Pope K.O. Impact dust not the cause of the Cretaceous-Tertiary mass extinction. *Geology*, 2002, no. 30 (2), pp. 99–102.

[8] Pierazzo, E., Kring D.A., Melosh H.J. Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases, *J. Geophys. Res*. 1998, vol. 103, iss. E12, pp. 28607–28625.

[9] Pierazzo E., Hahmann A.N., Sloan C. Chicxulub and climate: radiative perturbations of impact-produced S-bearing gases. *Astrobiology*, 2003, vol. 3, no. 1, pp. 99–118.

[10] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Computational Modeling of Conjugated Aerodynamic and Thermomechanical Processes in Composite Structures of High-speed Aircraft. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 98, pp. 4873–4880. http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.55405

[11] Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А. Применение метода RKDG для численного решения уравнений газовой динамики на неструктурированных сетках. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 4, с. 75–91.

[12] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Application of Finite Difference TVD Methods in Hypersonic Aerodynamics. *Finite Difference Methods, Theory and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9045, pp. 161–168. DOI 10.1007/978-3-319-20239-6_15

[13] Димитриенко Ю.И., Шугуан Ли. Конечно-элементное моделирование неизотермического стационарного течения неньютоновской жидкости в сложных областях. *Математическое моделирование и численные методы*, 2018, № 2, с. 70–95.

[14] Пархоменко В.П. Глобальная модель климата с описанием термохалинной циркуляции Мирового океана. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 1, с. 94–108.

[15] Пархоменко В.П. Применение квазислучайного подхода и ансамблевых вычислений для определения оптимальных наборов значений параметров климатической модели. *Информатика и ее применения*, 2017, т. 11, вып. 2, с. 65–74.

[16] Sewall J.O., van de Wal R.S.W., van der Zwan K., van Oosterhout C., Dijkstra H.A., Scotese C.R. Climate model boundary conditions for four Cretaceous time. *Clim. Past,* 2007, vol. 3, no. 4, pp. 647–657.

[17] Royer D.L. CO2-forced climate thresholds during the Phanerozoic, *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 2006, vol. 70, no. 23, pp. 5665–5675.

[18] Hong S.K., Lee Y.I. Evaluation of atmospheric carbon dioxide concentrations during the Cretaceous. *Earth Planet. Sci. Lett*., 2012, vol. 327, pp. 23–28.

[19] Brugger J., Feulner G., Petri S. Baby, it's cold outside: Climate model simulations of the effects of the asteroid impact at the end of the Cretaceous. *Geophysical Research Letters*, vol. 44, iss. 1, pp. 419–427.

[20] Pope K.O., Baines K.H., Ocampo A.C., Ivanov B.A. Energy, voltile production,and climatic effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact. *J. Geophys. Res.,* 1997, vol. 102, iss. E9, pp. 21645–21664.

[21] Vellekoop J., Sluijs A., Smit J., Schouten S., Weijers J.W.H. Sinninghe Damst J.S, Brinkhuis H. Rapid short-term cooling following the Chicxulub impact at the CretaceousPaleogene boundary. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2014, vol. 111, iss. 21, pp. 7537–7541.

[22] Renne P.R., Sprain C.J., Richards M.A., Self S., Vanderkluysen L., Pande K. State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous-Paleogene boundary, possibly induced by impact. *Science,* 2015, vol. 350, iss. 6256, pp. 76–78.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пархоменко В.П. Моделирование климатических последствий падения крупного астероида 66 млн лет назад. *Математическое моделирование и численные методы*, 2019, № 2, с. 68–83.

Пархоменко Валерий Павлович — канд. физ.-мат. наук, заведующий сектором моделирования климатических и биосферных процессов Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных публикаций. Область научных интересов: нестационарная газовая динамика, численные методы динамики сплошных сред, математическое моделирование климата. e-mail: vparhom@yandex.ru

Climatic effects modeling of the large asteroid impact 66 million years ago

© V.P. Parkhomenko[1,2]

[1]Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, 119333, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Studies indicate the mass death on Earth of a significant number of biological groups, in particular - dinosaurs, at the end of the Cretaceous, 66 million years ago. The final cause of this phenomenon remains the subject of discussion. Currently, there are two main theories: large-scale volcanic eruptions and the impact of an asteroid that formed the Chicxulub crater (Mexico). The production of sulfur-containing gases from the evaporation of the surface layers of the Earth during collisions is now considered the main source of climatic effects, since they form stratospheric sulfate aerosols that block sunlight and thus cool the atmosphere of the Earth and prevent photosynthesis. This paper presents the use of a joint climate model to study the effects of this asteroid on the Earth's climate. It was established that, depending on the time spent in the stratosphere of the aerosol, the global annual average temperature of the surface air decreased by 18 ° C–26 ° C, remained below zero for 4-30 years and a recovery time of more than 30 years was observed.

Keywords: *climate model, paleoclimate, Chiksulub.*

REFERENCES

[1] Renne P.R., Deino A.L., Hilgen F.J., Kuiper K.F., Mark D.F., Mitchell W.S., Morgan L.E., Mundil R., Smit J. Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 2013, vol. 339, iss. 6120, pp. 684–687.
[2] Schoene B., Samperton K.M., Eddy M.P., Keller G., Adatte T., Bowring S.A., Khadri S.F.R., Gertsch B. U-Pb geochronology of the Deccan Traps and relation to the end-Cretaceous mass extinction, *Science*, 2015, vol. 347, iss. 6218, pp. 182–184.
[3] Kring, D.A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.,* 2007, no. 255 (1-2), pp. 4–21.
[4] Feulner G. Climate-modelling of mass-extinction events: a review. *Int. J. Astrobiol.*, 2009, no. 8, pp. 207–212.
[5] Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 1980, vol. 208, iss. 4448, pp.1095–1108.
[6] Covey C., Thompson S.L., Weissman P.R., MacCracken M.C. Global climatic

effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. *Globa Planet. Change*, 1994, no. 9 (3-4), pp. 263–273.
[7] Pope K.O. Impact dust not the cause of the Cretaceous-Tertiary mass extinction. *Geology*, 2002, no. 30 (2), pp. 99–102.
[8] Pierazzo E., Kring D.A., Melosh H.J. Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases, *J. Geophys. Res*. 1998, vol. 103, iss. E12, pp. 28607–28625.
[9] Pierazzo E., Hahmann A.N., Sloan C. Chicxulub and climate: radiative perturbations of impact-produced S-bearing gases. *Astrobiology*, 2003, vol. 3, no. 1, pp. 99–118.
[10] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. Computational Modeling of Conjugated Aerodynamic and Thermomechanical Processes in Composite Structures of High-speed Aircraft. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 98, pp. 4873–4880. http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.55405
[11] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, no. 4(8), 2015, pp. 75–91.
[12] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Zakharov A.A. *Finite Difference Methods, Theory and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9045, pp. 161–168. DOI 10.1007/978-3-319-20239-6_15
[13] Dimitrienko Y. I., Li S. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye menody – Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2018, no. 2, pp. 70–95.
[14] Parkhomenko V.P. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 1, pp. 94–108.
[15] Parkhomenko V.P. *Informatika i ee primeneniya – Informatics and Applications*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 65–74.
[16] Sewall J.O., van de Wal R.S.W., van der Zwan K., van Oosterhout C., Dijkstra H.A., Scotese C.R. Climate model boundary conditions for four Cretaceous time. *Clim. Past,* 2007, vol. 3, no. 4, pp. 647–657.
[17] Royer D.L. CO2-forced climate thresholds during the Phanerozoic, *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 2006, vol. 70, no. 23, pp. 5665–5675.
[18] Hong S.K., Lee Y.I. Evaluation of atmospheric carbon dioxide concentrations during the Cretaceous. *Earth Planet. Sci. Lett*., 2012, vol. 327, pp. 23–28.
[19] Brugger J., Feulner G., Petri S. Baby, it's cold outside: Climate model simulations of the effects of the asteroid impact at the end of the Cretaceous. *Geophysical Research Letters*, vol. 44, iss. 1, pp. 419–427.
[20] Pope K.O., Baines K.H., Ocampo A.C., Ivanov B.A. Energy, voltile production,and climatic effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact. *J. Geophys. Res.,* 1997, vol. 102, iss. E9, pp. 21645–21664.
[21] Vellekoop J., Sluijs A., Smit J., Schouten S., Weijers J.W.H. Sinninghe Damst J.S, Brinkhuis H. Rapid short-term cooling following the Chicxulub impact at the CretaceousPaleogene boundary. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2014, vol. 111, iss. 21, pp. 7537–7541.
[22] Renne P.R., Sprain C.J., Richards M.A., Self S., Vanderkluysen L., Pande K. State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous-Paleogene boundary, possibly induced by impact. *Science,* 2015, vol. 350, iss. 6256, pp. 76–78.

Parkhomenko V.P., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Division for Modeling of Climatic and Biosphere Processes, Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 120 research publications. Research interests: nonstationary gas dynamics, numerical methods for continuous media dynamics, mathematical modeling of climate.
e-mail: vparhom@yandex.ru