

Тротиловый эквивалент

В.Н. Витер



Старшее поколение, безусловно, помнит, когда в выпусках новостей передавали: «Проведено ядерное испытание мощностью столько-то килотонн в тротиловом эквиваленте». Что означает «килотонна в тротиловом эквиваленте» догадаться не сложно – это единица мощности взрыва, которая соответствует по энергии взрыву тысячи тонн 2,4,6-тринитротолуола (ТНТ). С помощью тротилового эквивалента можно характеризовать не только взрывы, но и другие события, которые сопровождаются большим выделением энергии – землетрясения, падение астероидов и комет, извержения вулканов и т.д.

Итак, начнем. При взрыве одного грамма тротила выделяется 4184 джоулей или 1000 термохимических калорий. Для нашей повседневной жизни это немалая величина: ведь калория – количество энергии, необходимое для нагрева 1 грамма воды на 1 градус. Энергии 1000 кал. хватит, чтобы нагреть целый литр воды на 1°C, но по сравнению с мощностью природных стихий это даже не капля в море.

При взрыве 1 килограмма ТНТ выделяется $4.184 \cdot 10^6$ Дж, одной тонны ТНТ – $4.184 \cdot 10^9$ Дж. Дальше – больше:

$$1 \text{ килотонна (кт) ТНТ} = 4,184 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$$

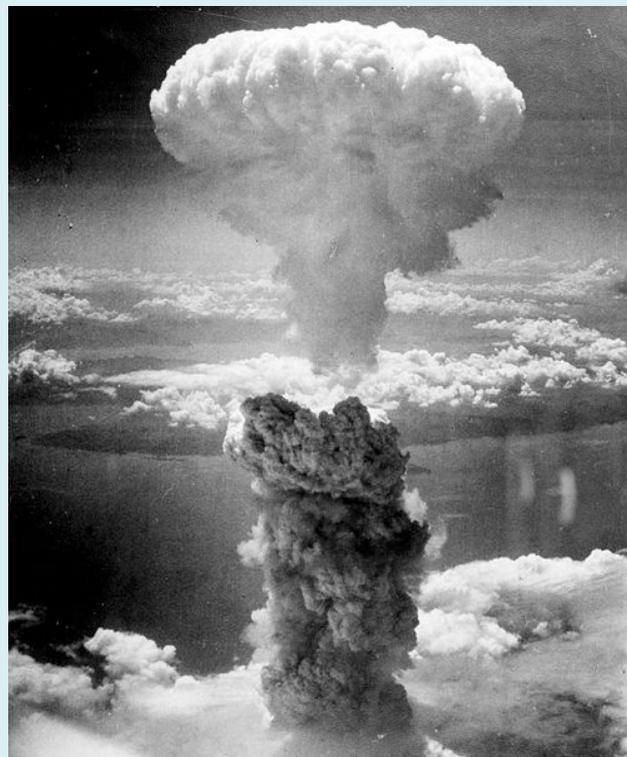
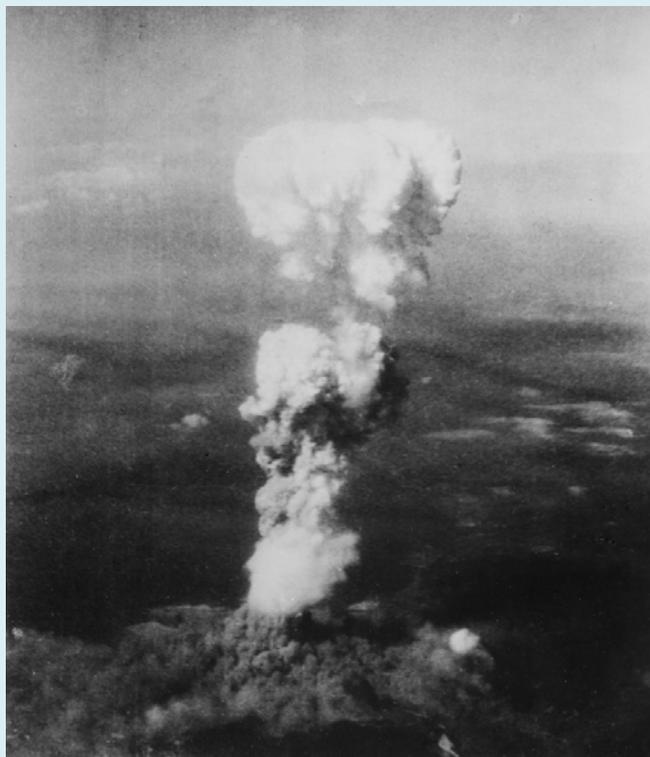
$$1 \text{ мегатонна (Мт) ТНТ} = 4.184 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ гигатонна (Гт) ТНТ} = 4.184 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$$

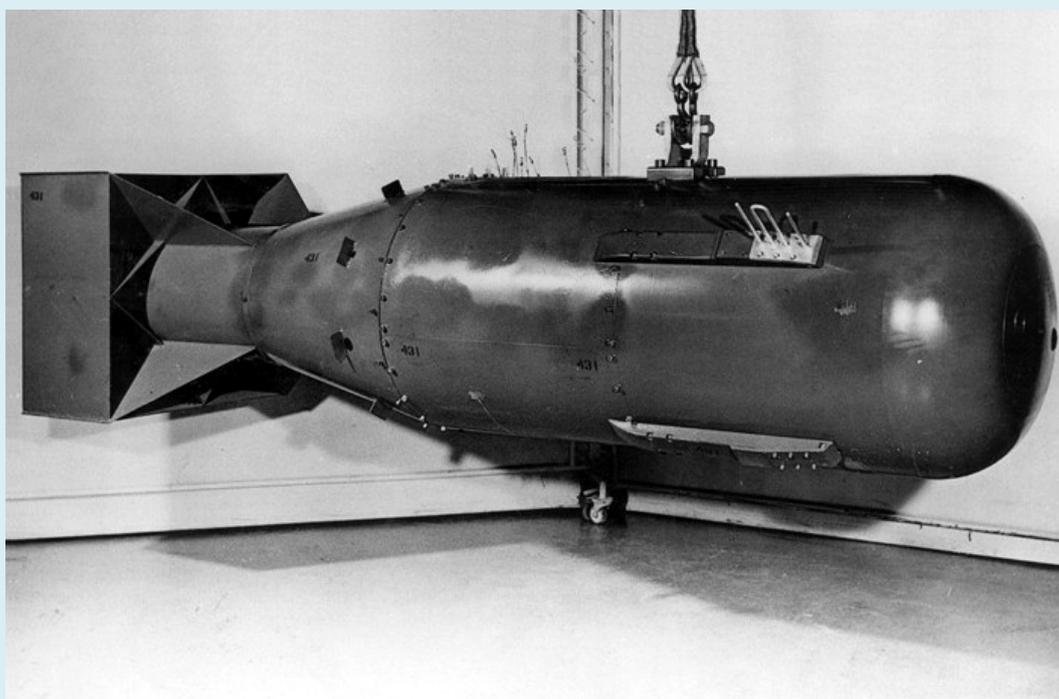
Теперь попробуем связать эту энергию с реальными событиями. Взрыв атомной бомбы, которая разрушила японский город Хиросима, имел мощность примерно 13-18 кт ТНТ. Общее число погибших составило от 90 до 166 тысяч человек. По современной классификации это был ядерный взрыв средней силы (т.е. от 1 до 100 кт).

Взрыв мощностью 20 кт ведет к полному разрушению всего радиусе около 1 км, 20 Мт – уже 10 км. Как показали расчеты, при взрыве мощностью 100 Мт зона полного разрушения будет иметь радиус около 35 км, сильных разрушений — около 50 км.

Одним таким взрывом можно полностью уничтожить любой из самых крупных городов Земли.



Ядерный взрыв над Хиросимой (слева) и Нагасаки (справа)



Макет бомбы «Малыш» (Little boy), которая была взорвана над Хиросимой

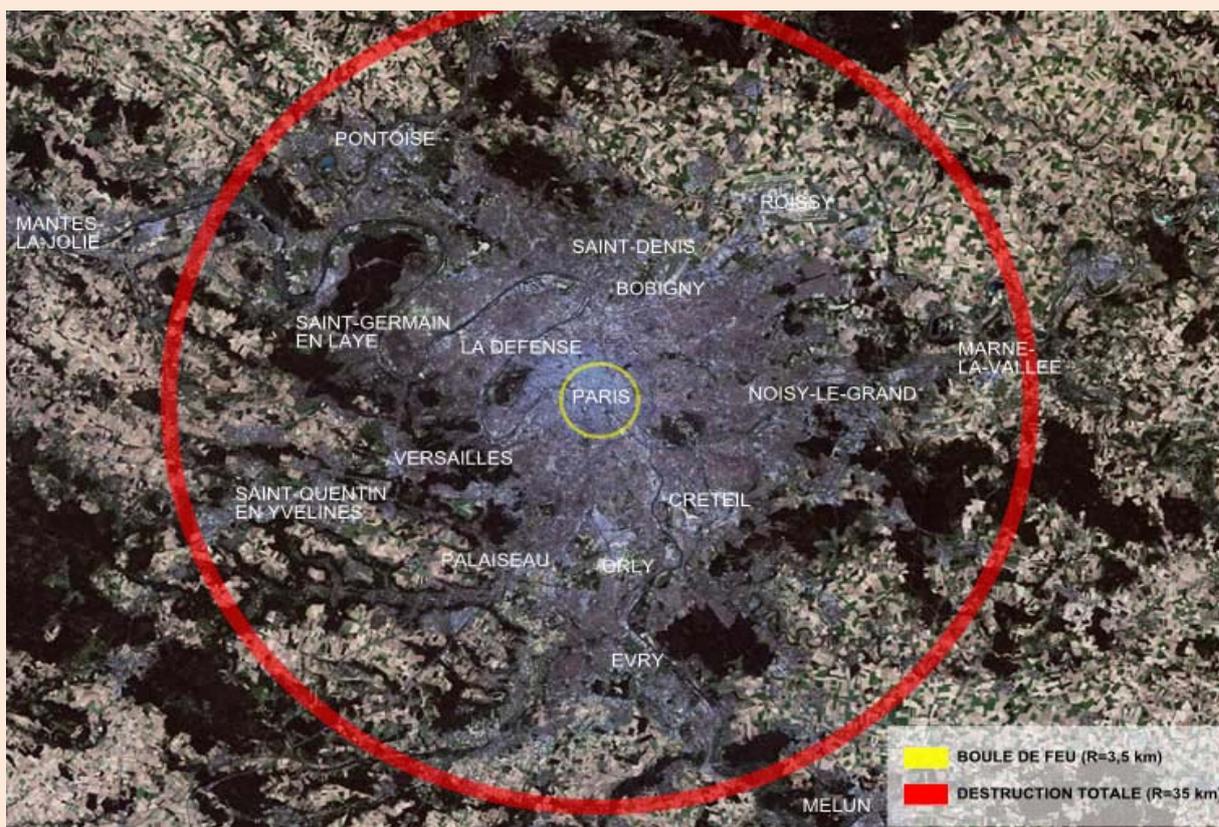
Самым мощным испытанным устройством является термоядерная бомба АН602 или Царь-Бомба (она же «Кузькина мать»), которая была взорвана на острове Новая Земля. Ее мощность составляла примерно 58 Мт ТНТ ($2.4 \cdot 10^{17}$ Дж). Причем это была только «демо-версия» – проектная мощность такой бомбы составляла 100 Мт ($4.2 \cdot 10^{17}$ Дж). «Полную версию» бомбы не стали испытывать, опасаясь непредвиденных последствий.



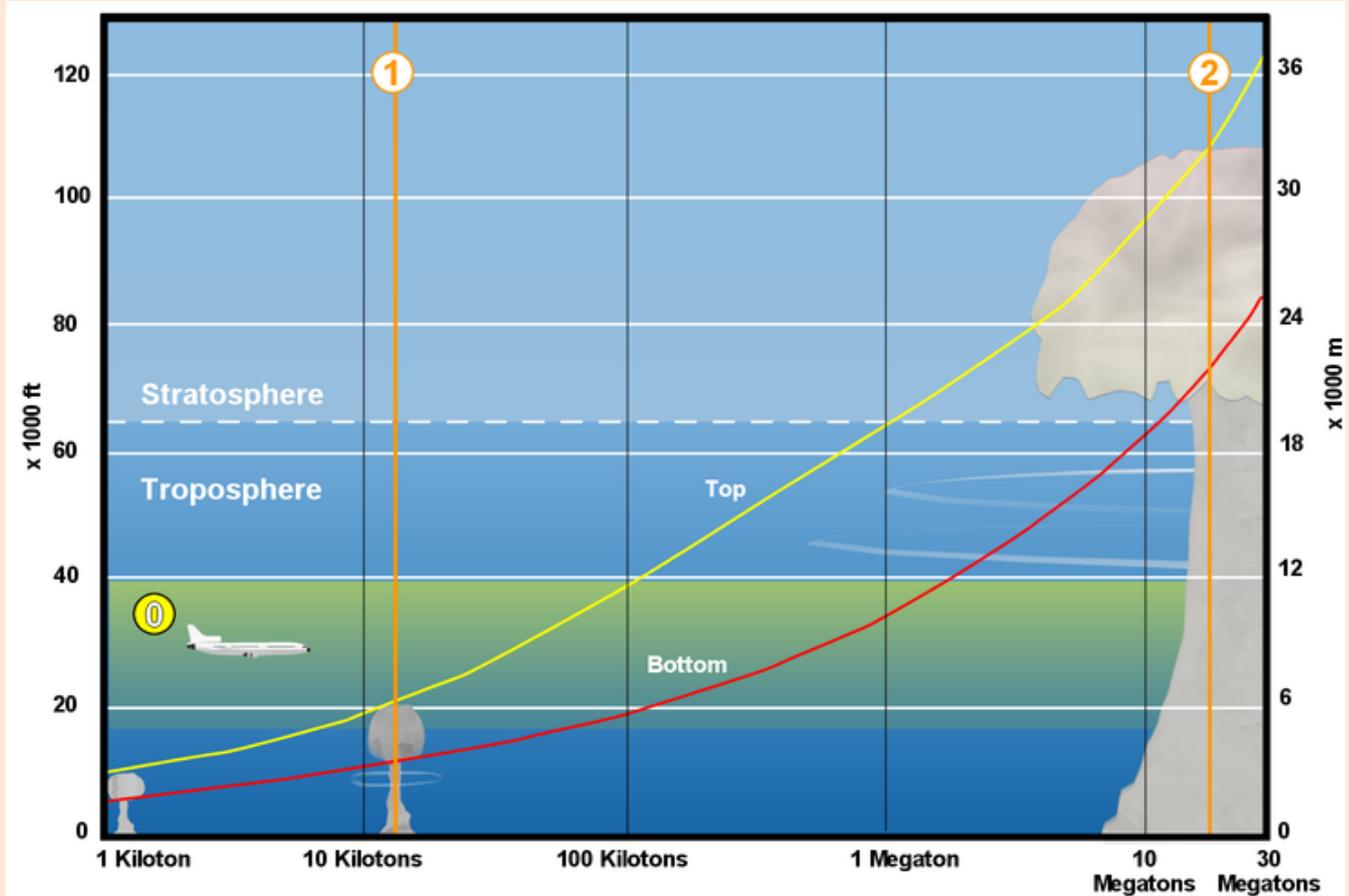
«Царь-бомба» АН602



Взрыв термоядерной бомбы на Новой Земле



Радиус полного разрушения при взрыве бомбы мощностью 100 Мт.
Для наглядности наложена карта Парижа



Зависимость размеров гриба от мощности устройства

Но даже при испытании «ослабленного варианта» Царь-Бомб ядерный гриб поднялся на высоту 67 километров, диаметр его двухъярусной «шляпки» достиг (у верхнего яруса) 95 километров.

Огненный шар взрыва (радиусом примерно 4.6 километра) достиг поверхности Земли — что нехарактерно для воздушных ядерных испытаний. Излучение вызывало ожоги третьей степени на расстоянии до 100 километров. Свидетели почувствовали удар и смогли описать взрыв на расстоянии тысячи километров от его центра. Ударная волна, возникшая в результате взрыва, три раза обогнула земной шар. Звуковая волна взрыва достигла острова Диксон на расстоянии около 800 километров. Ионизация атмосферы стала причиной помех радиосвязи даже в сотнях километров от полигона в течение около 40 мин.

Казалось бы, энергия взрыва термоядерных устройств огромна, но природа время от времени напоминает человеку, кто в доме хозяин. Например, подводное землетрясение в Индийском океане, которое произошло 26 декабря 2004 года, высвободило энергию $2.0 \cdot 10^{18}$ Дж или 480 Мт в тротиловом эквиваленте, что примерно 8 раз больше, чем при взрыве Царь-Бомбы. Этой энергии достаточно для того, чтобы вскипятить по 150 литров воды каждому жителю Земли.

Землетрясение вызвало разрушительное цунами, которое стало самым смертоносным стихийным бедствием за современную историю. Магнитуда землетрясения по разным оценкам составляла от 9.1 до 9.3, это второе или третье по силе землетрясение за всю историю наблюдения.

Эпицентр землетрясения находился в Индийском океане, к северу от острова Симелуэ, расположенного возле северо-западного берега острова Суматры (Индонезия). Цунами достигло берегов Индонезии, Шри-Ланки, юга Индии, Таиланда и других стран. Высота волн превышала 15 метров. Цунами привело к огромным разрушениям и огромному количеству погибших людей, в том числе и в Порт-Элизабет в ЮАР в 6900 км от эпицентра. По разным оценкам погибло от 225 000 до 300 000 человек. Точную цифру жертв мы так никогда и не узнаем. Предполагается, что поверхность Земли совершила колебание в пределах 20-30 см, что эквивалентно приливным силам, действующим со стороны Солнца и Луны. Ударная волна землетрясения прошла через всю планету, в США, в штате Оклахома были зафиксированы вертикальные колебания в 3 мм. Тихоокеанские острова, которые находились в районе эпицентра, были сдвинуты на десятки метров. Сдвиг масс и огромный выброс энергии ненадолго изменили вращение Земли. Согласно теоретическим моделям землетрясение уменьшило продолжительность суток примерно на 2.68 микросекунды.





Цунами после землетрясения в Индийском океане 2004 г





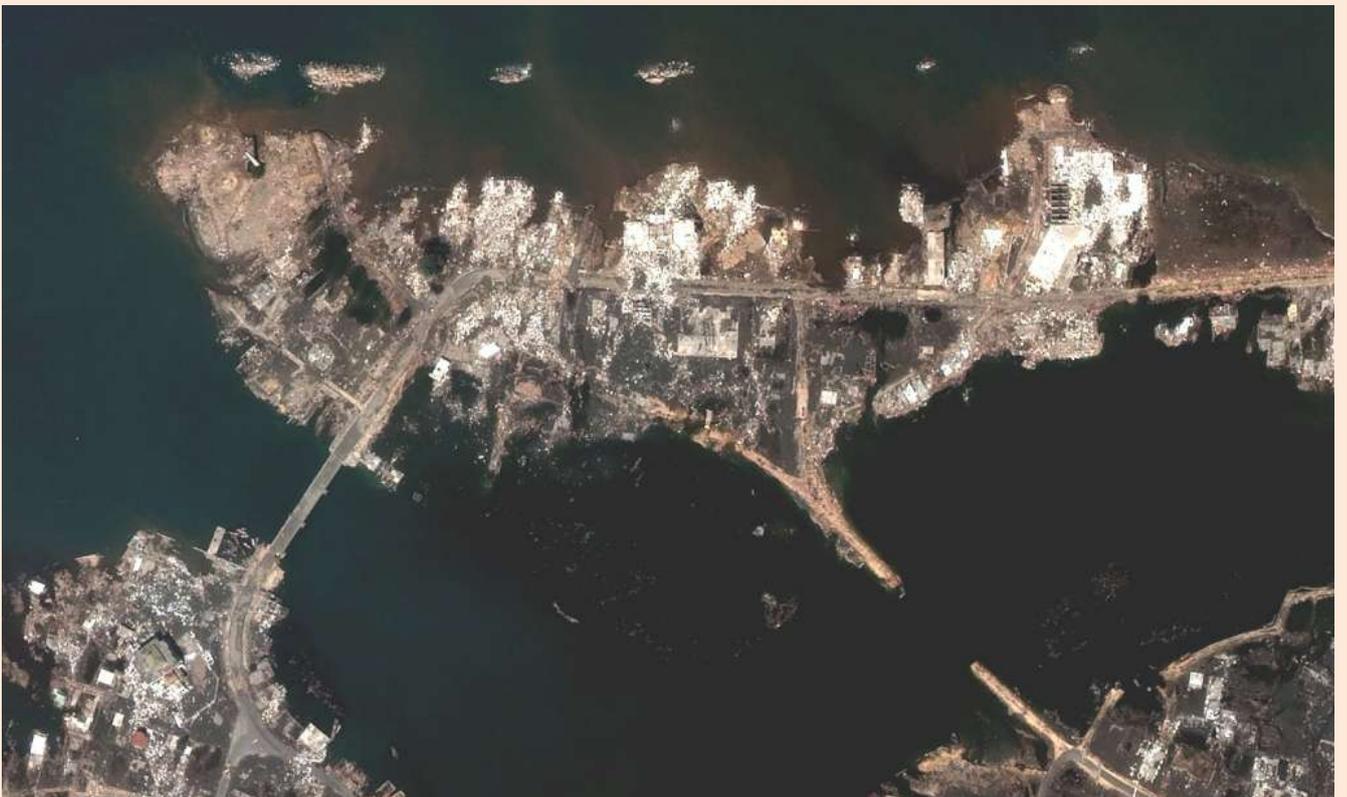


Фото индонезийского города Банда-Ачех (Banda Aceh) до и после цунами 2004 г

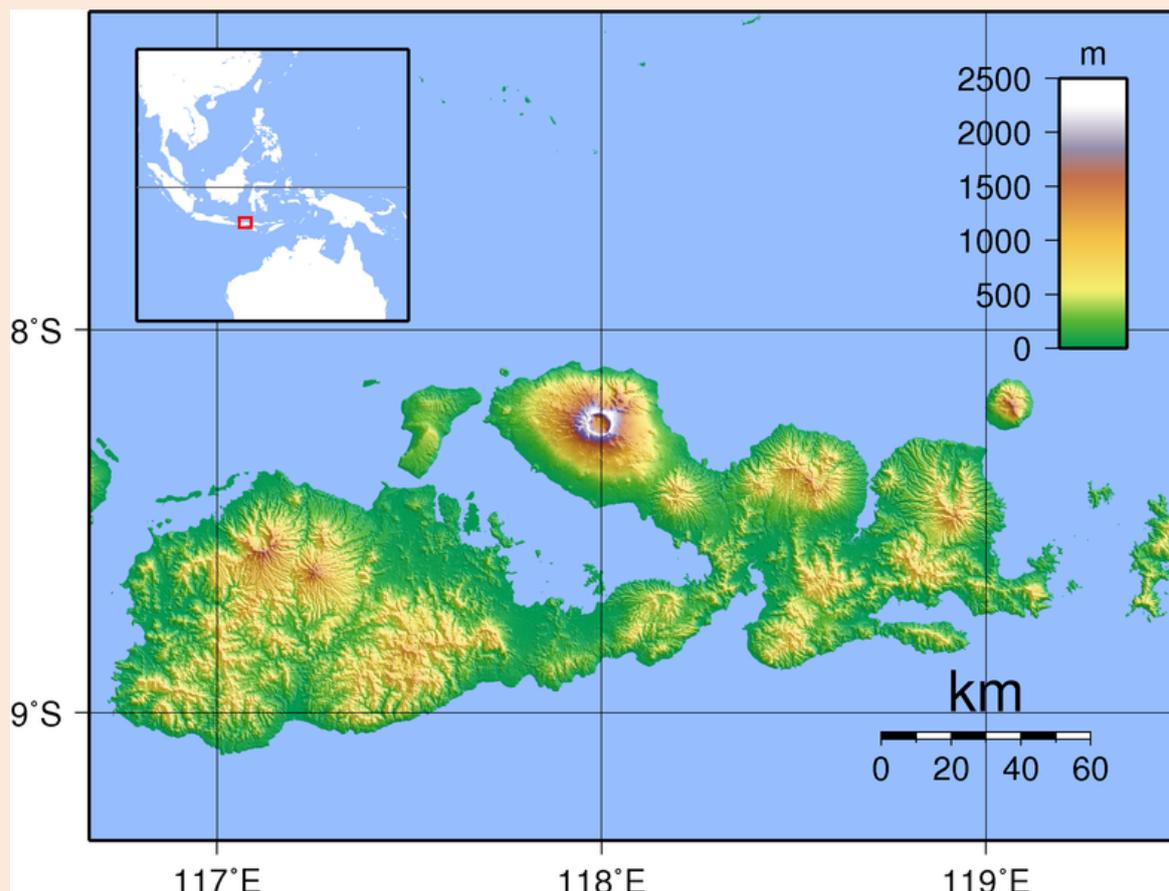


Страны, которые наиболее пострадали от последствий землетрясения 2004 г

Суммарная энергия всех землетрясений на нашей планете составляет порядка 10^{19} Дж в год (почти 2.5 Гт ТНТ).

Самым мощным и самым трагическим извержением за последние столетия было извержение вулкана Тамбора на острове Сумбава в Индонезии, которое произошло в 1815 году. Извержение началось 5 апреля и продолжалось примерно до 15 апреля. Общий объем лавы и пепла составил $150-180 \text{ км}^3$. Было выброшено около $1.4 \cdot 10^{14}$ кг пирокластического материала, в результате извержения образовалась кальдера диаметром 6.5-7 км и глубиной до 700 м. До извержения вулкан Тамбора имел высоту около 4300 м, после извержения – приблизительно 2850 м. Общая энергия извержения вулкана Тамбора оценивается в $8.4 \cdot 10^{19}$ Дж (20 Гт ТНТ).

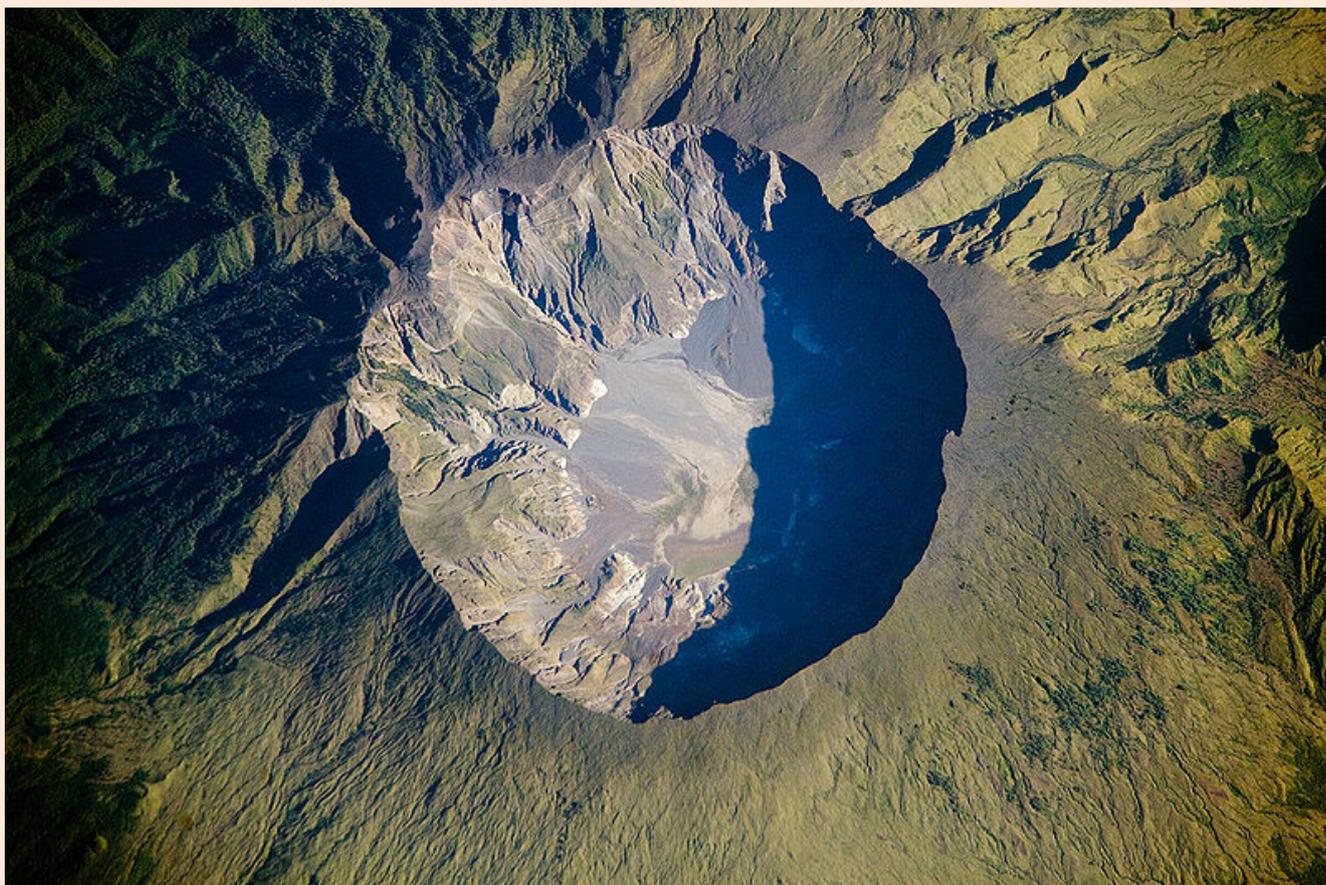
Для сравнения: во время извержения вулкана Санторин было выброшено около $60-65 \text{ км}^3$ породы, вулкана Кракатау - 20 км^3 . Энергия извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 оценивается величиной порядка 10^{17} Дж.



Расположение горы Тамбора



Спутниковый снимок вулкана и окрестностей



Кальдера на вершине вулкана Тамбора

Выброшенные в воздух огромные массы вулканического пепла в течение трех суток скрывали от солнечного света территорию в радиусе до 500 км от вулкана Тамбора. Большая часть острова Сумбава, площадь которого превышает 13000 км², была покрыта слоем пепла более 1 м толщиной. Под его тяжестью разваливались даже каменные постройки. Из более чем 10-тысячного населения острова в живых осталось только 29 человек. Соседний остров Ломбок, который находился на расстоянии 150-200 км от вулкана, был засыпан слоем пепла в 60 см. Пепел достиг Батавии (в 1300 км от вулкана) и остров Сулавеси. Пемза покрыла большие площади океана, препятствуя движению кораблей. Последствия извержения затронули Молуккские острова, остров Ява, частично Сулавеси, Суматру и Борнео. Десятки тысяч людей умерли от голода и болезней. Общую цифру жертв установить невозможно, но по некоторым оценкам она достигла 90000 человек.

Извержение Тамбора оказало мощное влияние на климат. В верхние слои атмосферы было выброшено много пепла, что привело к глобальному похолоданию. Наступила «вулканическая зима». В Северной Европе и на востоке Северной Америки летом наблюдались небывало низкие температуры. Зимний снег сошел только в июне,

а в августе уже начались заморозки: 1816 г так и прозвали «год без лета». Изменения климата вызвали неурожай и голод. Множество европейцев, все еще страдавших от последствий Наполеоновских войн, эмигрировали в Америку.



Выброс вулканического пепла. Вулкан Кливленд, Аляска

Примерно 65 млн. лет назад на полуостров Юкатан (Мексика) упал астероид диаметром около 10 км (т.е. больше горы Эверест). При ударе образовался кратер Чиксулуб диаметром 180 км и выделилась энергия, эквивалентная $5 \cdot 10^{23}$ Дж или в 100000 Гт в тротиловом эквиваленте. Предполагается, что удар вызвал цунами высотой 50-100 м. Раскаленные обломки взлетели высоко в атмосферу (а некоторые – далеко за пределы атмосферы), падая они нагрели воздух до температуры духовки. В атмосферу было выброшено большое количество пыли, которая на несколько лет закрыла поверхность Земли от прямых солнечных лучей. На смену огню пришла «ядерная зима».

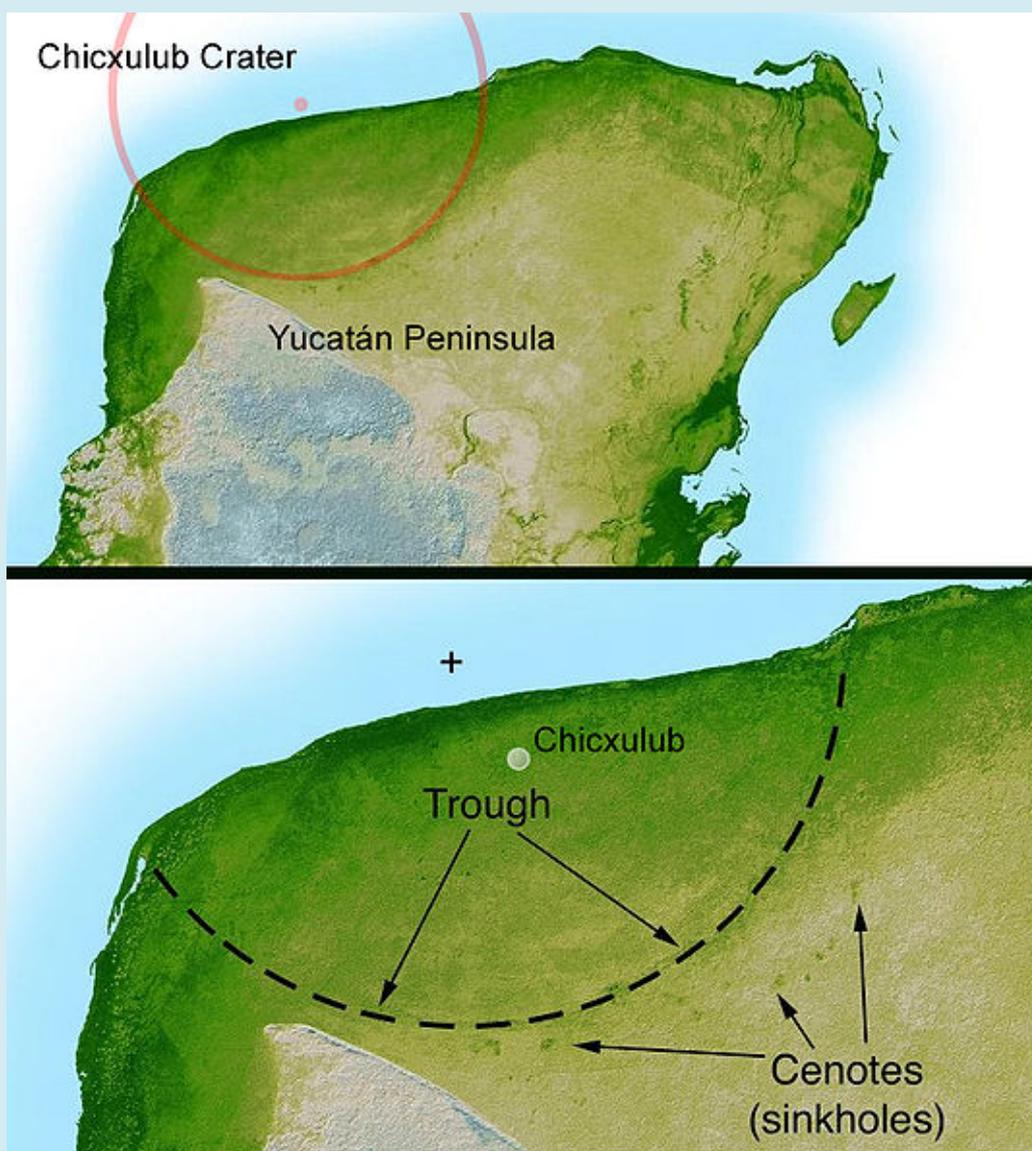
Падение астероида на полуострове Юкатан приблизительно совпадает со временем массового вымирания большинства земных видов на границе мезозойского и кайнозойского периодов. Большинство ученых считают, что именно это событие вызвало гибель динозавров.



Полуостров Юкатан



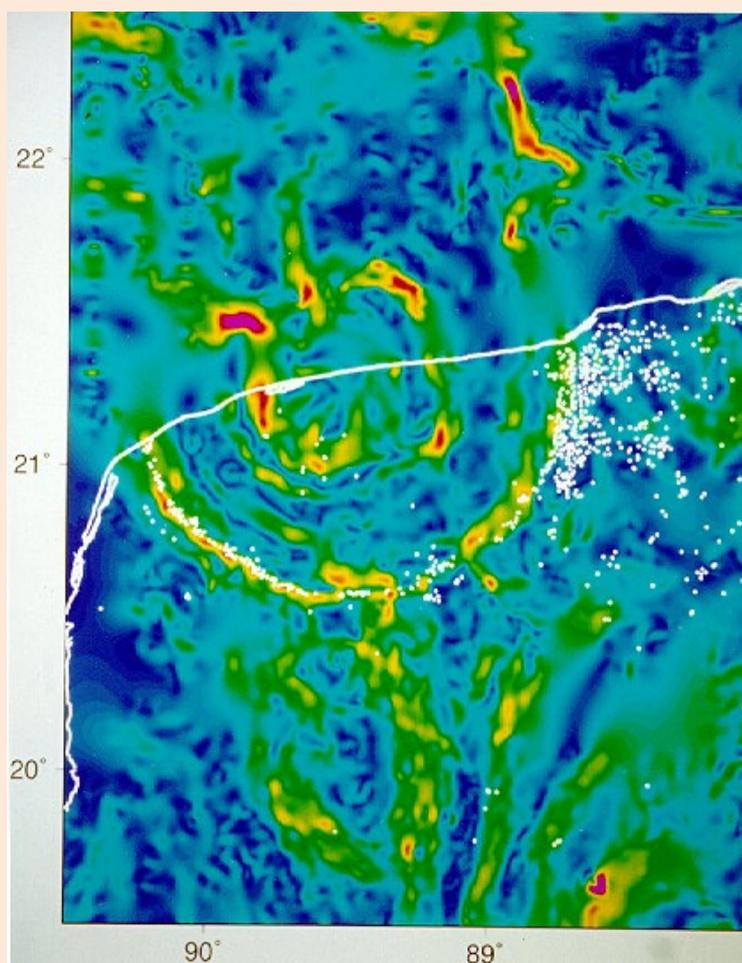
Спутниковый снимок полуострова Юкатан



Радарная топография показывает наличие кратера диаметром 180 км

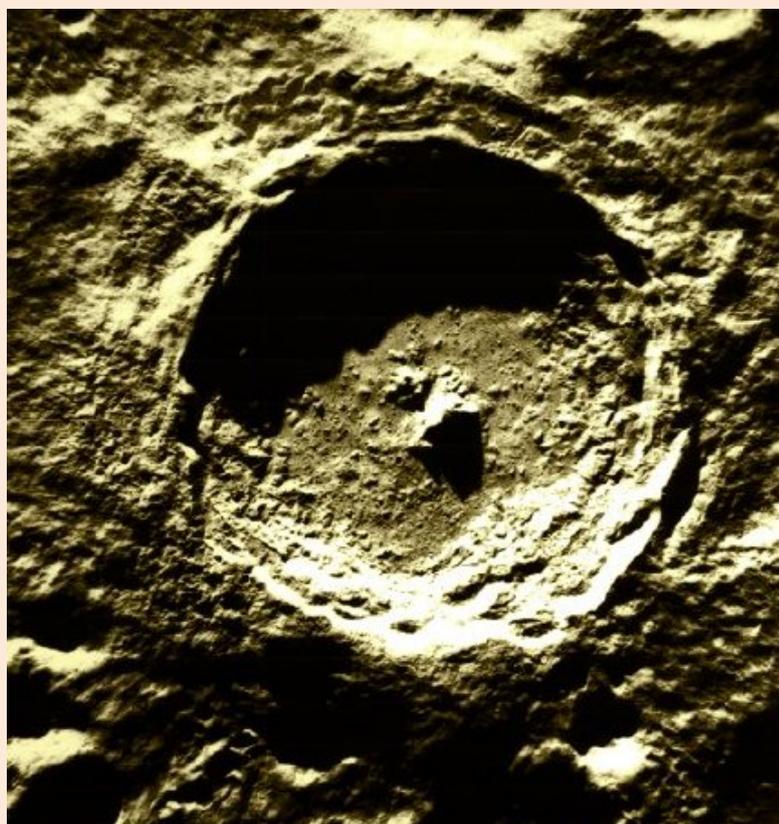
Большинство следов прошлого столкновения исчезло. Кратер Чиксулуб уже давно не выглядит как ударные кратеры на Луне или Марсе. Но свидетельства этой катастрофы мы находим даже через многие миллионы лет. С помощью гравиметрических измерений удалось обнаружить распределение масс, характерное для ударных кратеров. Эта структура расположена под слоем более мягких осадочных пород, которые наслоились позднее.

В джунглях Юкатана встречаются многочисленные сеноты (исп. cenote) — вертикальные пещеры, заполненные пресной водой. Они представляют собой колодцы или небольшие озера и образовались в результате разрушения первичного кратера. Сеноты служили источником пресной воды для цивилизации майя. Индейцы считали их священными. Особенно был известен священный сенот в городе Чичен-Ица. На языке майя сенот звучало как «цонот» — нечто глубокое.



Гравитационная аномалия в районе кратера Чиксулуб. Красным и желтым показаны места с повышенным, зеленым и синим – с пониженным уровнем гравитации. Белыми точками обозначены сеноты – природные колодцы или небольшие озера, которые образовались при разрушении первичного кратера.

Белой линией показан контур побережья

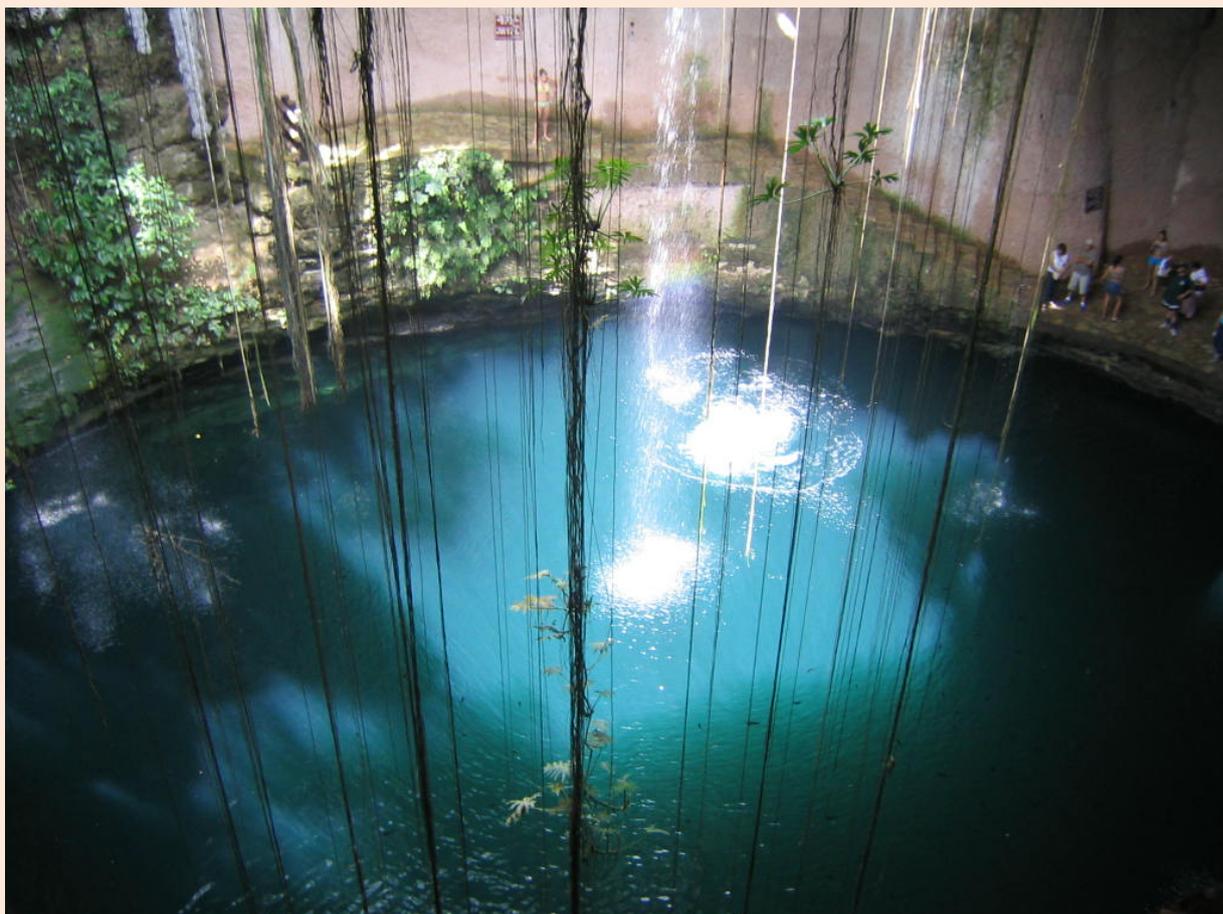


Кратер Тихо – один из самых больших и известных кратеров Луны. Существует гипотеза, что кратер Тихо образовался примерно в то же время, что и кратер Чиксулуб, другими словами, астероид, упавший на Землю мог входить в состав группы астероидов, которые двигались по схожим орбитам



Кратер Тихо имеет диаметр около 85 км и хорошо виден на фоне лунного диска. От кратера на многие километры расходятся характерные «лучи»





Сеноты







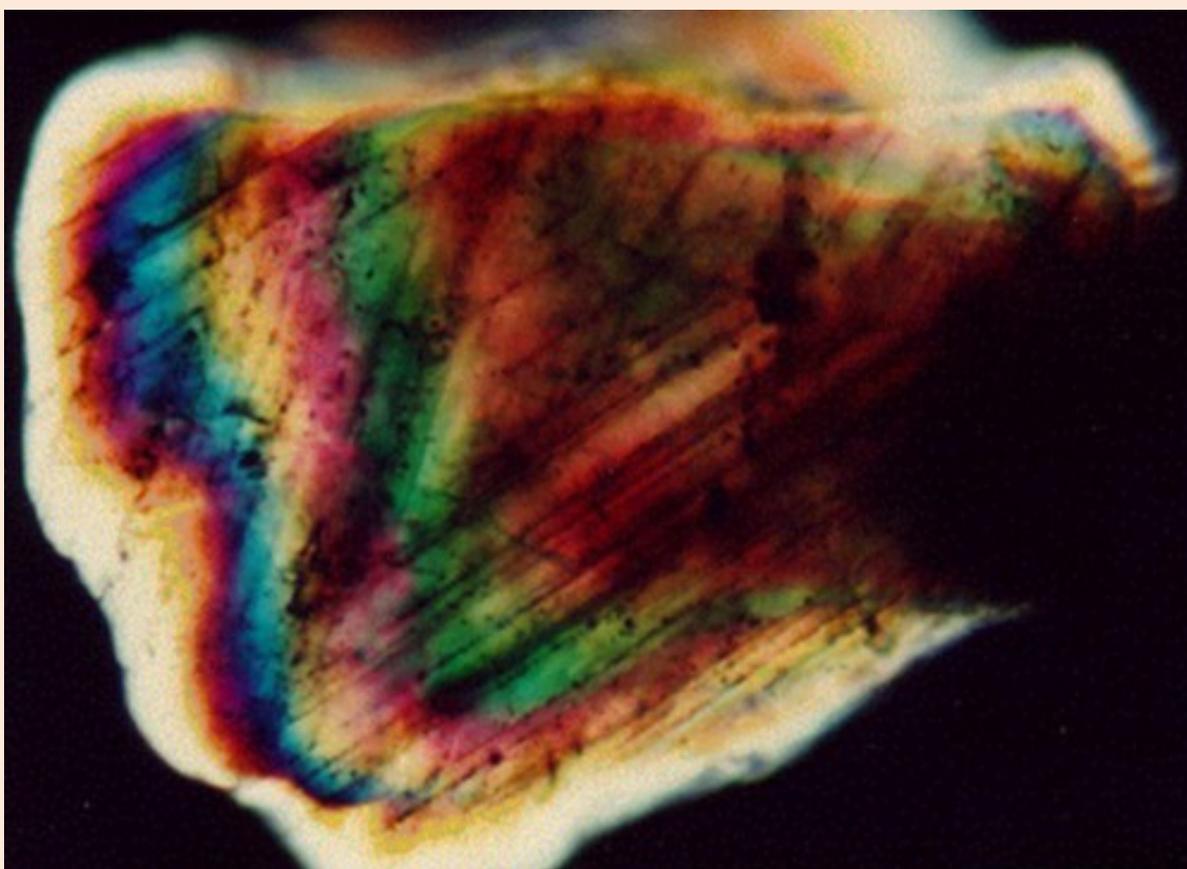
Важным свидетельством глобальной катастрофы является тонкий слой глины, в котором концентрация иридия в 15 раз превышает нормальную. Иридий – довольно редкий металл на Земле, однако он в значительных количествах содержится в некоторых метеоритах и астероидах.



Второй снизу зеленый слой глины имеет высокое содержание иридия



Образец кварца из кратера Чиксулуб



Такая картина в поляризованном свете является свидетельством деформации кристаллической решетки кварца под действием сильного ударного сжатия

Доказательства прошлого столкновения получены также при исследовании образцов кварца из кратера Чиксулуб. Кристаллическая решетка диоксида кремния несет следы сильного ударного сжатия, которое наблюдается при падении метеоритов.

В отличие от Луны и Меркурия, практически лишенных атмосферы, на Земле

следы ударов метеоритов и астероидов быстро стираются под действием воды и ветра. Но некоторые ударные кратеры все-таки дожили до наших дней, сохранив характерную форму. Например, в Аризоне (США), в 30 км к западу от города Уинслоу расположен метеоритный кратер диаметром 1200 метров и глубиной 180 метров.

Аризонский кратер образовался примерно 50 тысяч лет назад при падении метеорита около 50 м в диаметре. Метеорит весил 300 тыс. т и летел со скоростью 45-60 тысяч км/ч. Внутри и вокруг Аризонского кратера найдены частицы метеорита, которые состоят из сплава железа и никеля.

Энергия взрыва при падении аризонского метеорита составляла «всего» 20 Мт ТНТ – несравнимо меньше, чем в случае столкновения на полуострове Юкатан. Но даже такое столкновение более чем в 1000 раз превосходит по энергии взрыв атомной бомбы в Хиросиме.



Аризонский метеоритный кратер





Аризонский кратер из космоса

Однако земные катастрофы – безобидная игрушка по сравнению с силами космическими. Как известно, соотношение между массой и энергией устанавливает простая формула:

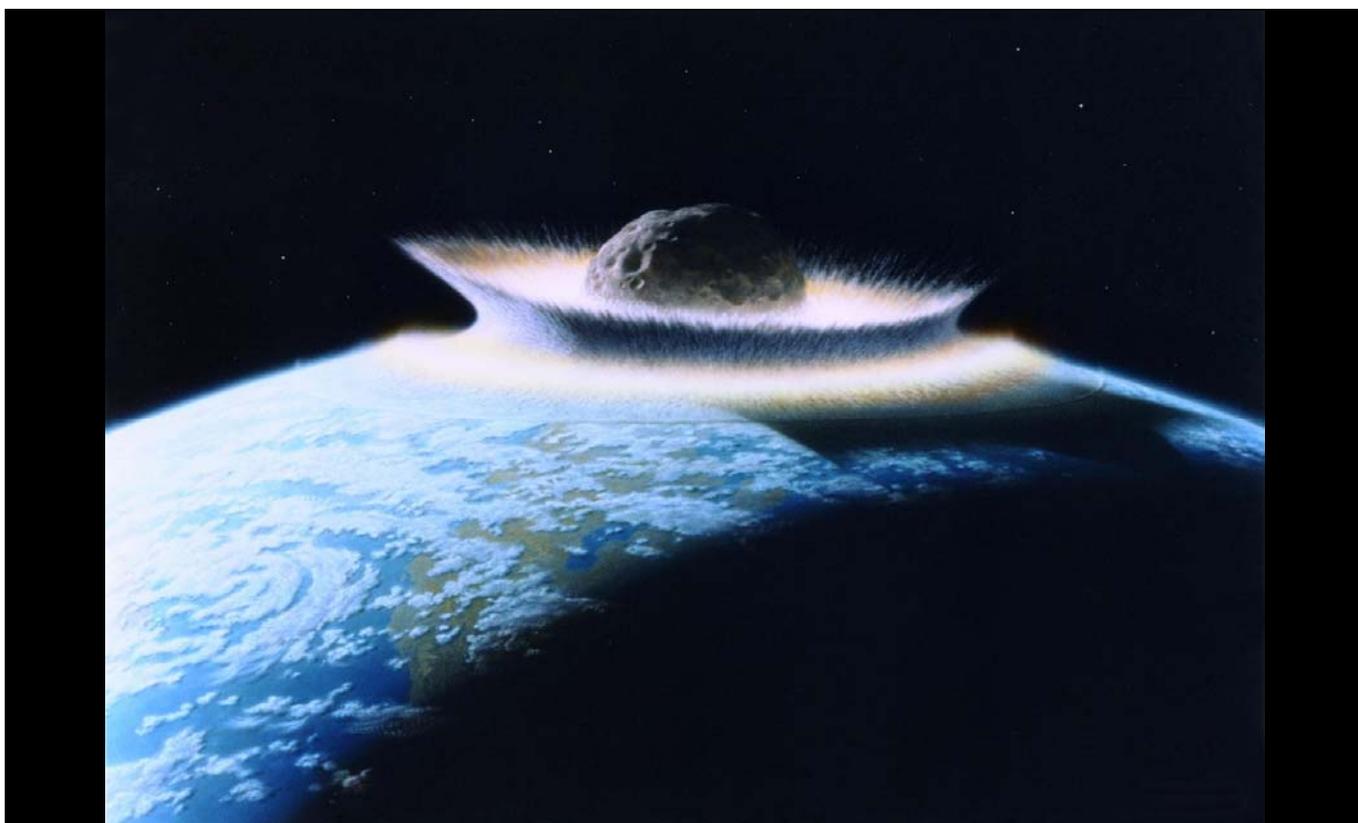
$$E = mc^2$$

где E – энергия, Дж, m – масса, кг c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Нетрудно подсчитать, что взрыв атомной бомбы, которая разрушила Хиросиму, соответствует полному превращению в энергию всего 0.7 г вещества, при взрыве на Новой Земле в энергию превратилось 2.7 кг. Для сравнения, общее мировое производство электроэнергии за 2005 год составило $18138.3 \cdot 10^9$ кВт·ч¹ или $6.5 \cdot 10^{19}$ Дж, что соответствует взрыву 15.5 Гт ТНТ. Это эквивалентно превращению в энергию $m = E/c^2 = 6.5 \cdot 10^{19} / (3 \cdot 10^8)^2 \approx 720$ кг вещества.

Если всю электрическую энергию, которую выработало человечество в 2005 г принять за единицу, то энергия катастрофического землетрясения Индийском океане (2004 г) будет равна 1/30, суммарная годовая энергия всех землетрясений – 1/7, а энергия водородной бомбы, взорванной на Новой Земле – всего 0.004. По такой шкале энергия столкновения на полуострове Юкатан будет равна 1500000.

Простой расчет показывает, что при столкновении на полуострове Юкатан в энергию перешло $m = E/c^2 = 5 \cdot 10^{23} / (3 \cdot 10^8)^2 \approx 5000000$ кг или 5000 т вещества.



¹ 1 кВт·ч = 3600000 Дж



Основным источником энергии на Земле является Солнце. Большая часть солнечной энергии излучается в виде электромагнитных волн. Общая светимость Солнца составляет $3.846 \cdot 10^{26}$ Вт (т.е. $3.846 \cdot 10^{26}$ Дж в секунду), что примерно соответствует взрыву 100 млрд. термоядерных бомб, мощностью по 1 Мт ТНТ. Каждую секунду на Солнце сгорает примерно 600 млн. т водорода, при этом в чистую энергию переходит около 4.3 млн. т массы.

Энергия Солнца рождается в результате превращения водорода в гелий. Процесс идет через несколько промежуточных стадий и характеризуется суммарным уравнением:

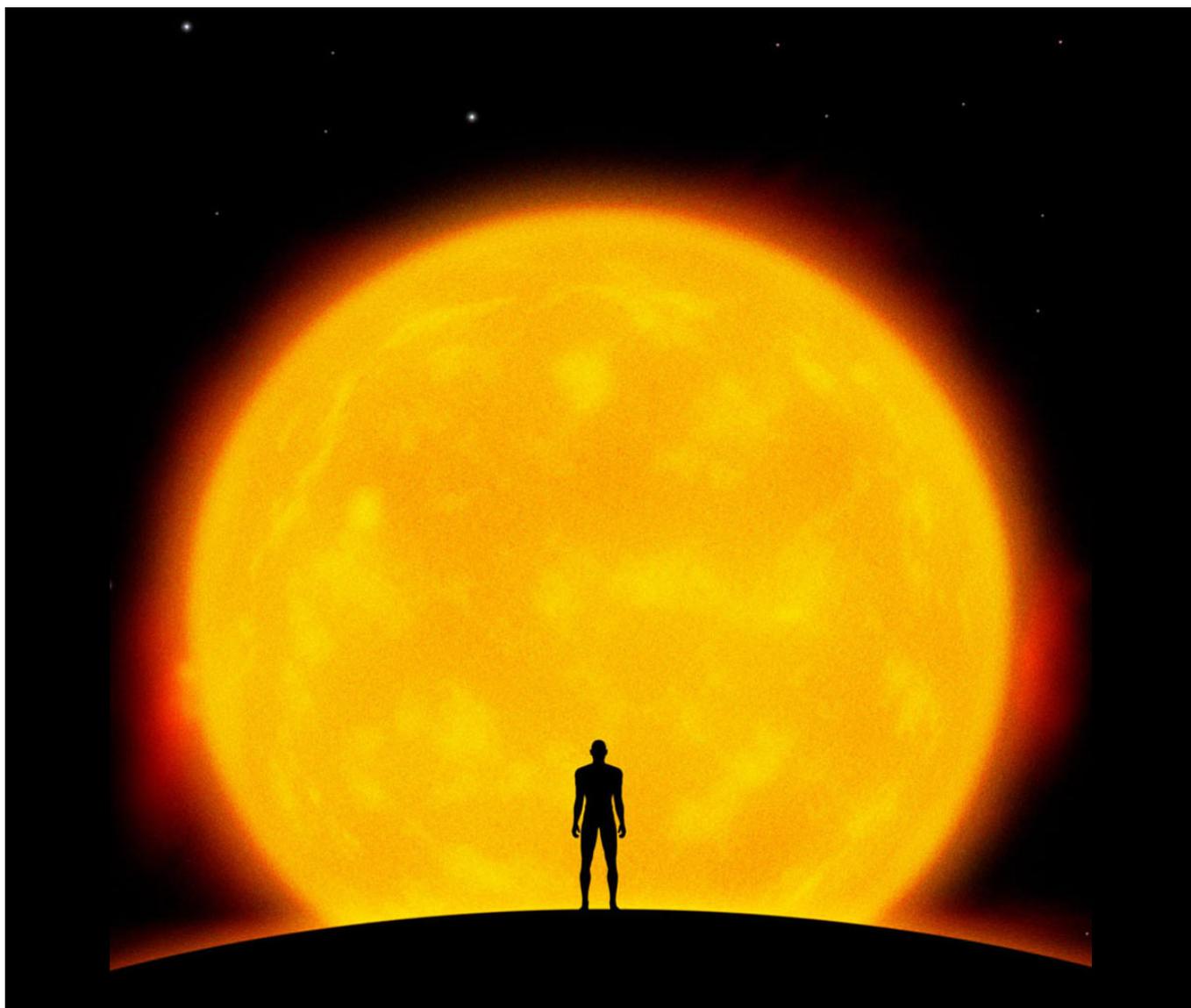


При «сгорании» 1 г протонов выделяется в 20 млн. раз больше энергии, чем при сгорании 1 г каменного угля.

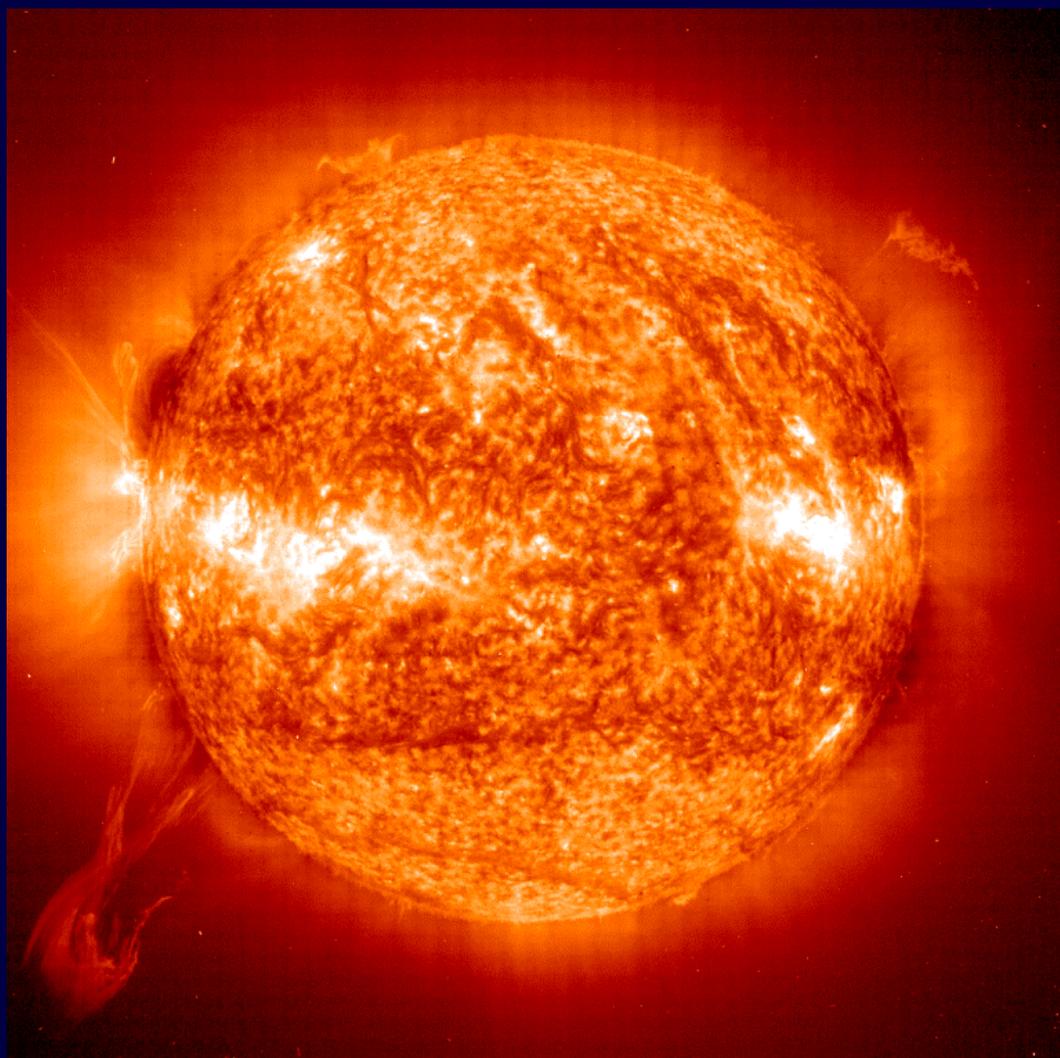
Солнце излучает энергию в широкой области спектра. Примерно 48% энергии излучения приходится на видимое излучение, при этом максимум соответствует желто-

² МэВ – миллион электронвольт. Один электронвольт равен энергии, которая необходима для переноса электрона в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж

зеленому цвету. Около 45% энергии, вырабатываемой Солнцем, уносят инфракрасные лучи. На гамма-лучи, рентгеновское, ультрафиолетовое и радиоизлучение приходится лишь 8%. Наше Солнце за секунду генерирует в 100000 раз больше энергии, чем человечество произвело за всю свою историю. С другой стороны, на каждый килограмм солнечного вещества приходится всего $2 \cdot 10^{-4}$ Вт энергии. По удельной мощности Солнце слабее, чем такой источник тепла как человек и примерно соответствует куче преющих листьев.



Земля получает приблизительно 1370 Вт/м^2 солнечной энергии. В ясную погоду (когда Солнце находится в зените) примерно 370 Вт/м^2 поглощается атмосферой, до земной поверхности доходит только 1000 Вт/м^2 . В пасмурный зимний день эта цифра может уменьшиться до 100 Вт/м^2 .

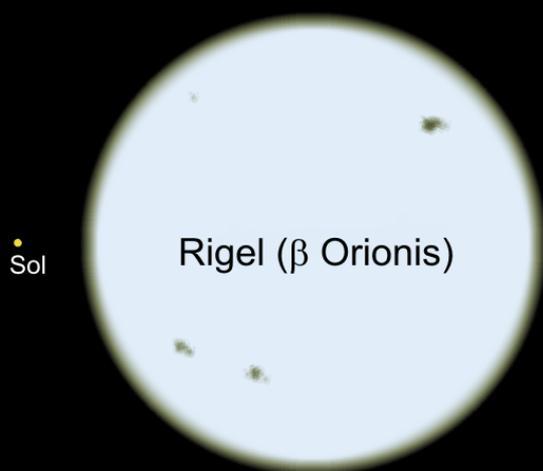


Солнце – далеко не самая яркая и не самая крупная звезда. Есть много звезд, которые значительно превосходят наше Солнце и по массе и по светимости. Если принять светимость Солнца за единицу, то светимость некоторых других звезд будет иметь значения: Сириус – 22, Вега – 50, Арктур – 107, Канопус – 4700.

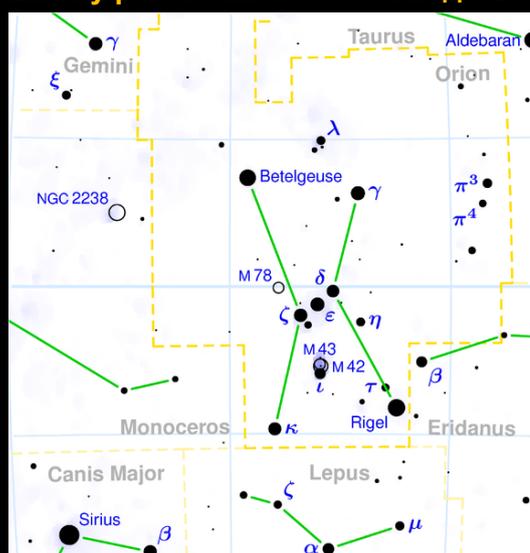
Но все эти светила выглядят не впечатляюще по сравнению со звездами-сверхгигантами. Масса большинства сверхгигантов варьируются от 10 до 70 масс Солнца, светимость — от 30 000 до сотен тысяч солнечных. Радиусы этих звезд могут сильно отличаться, но обычно они составляют от 30 до 500 радиусов Солнца.



Так выглядела бы звезда Ригель с расстояния, равному расстоянию от Земли до Солнца



Сравнение звезды Ригель и Солнца



Например, звезда Ригель является бело-голубым сверхгигантом. Ригель имеет диаметр около 95 млн. км (в 68 раз больше Солнца), его абсолютная звездная величина -7^m , светимость Ригеля в 80000 раз выше солнечной. Ригель расположен на расстоянии примерно 870 световых лет от Солнца в созвездии Ориона.

Однако, даже среди звезд сверхгигантов есть свои гиганты. Такие звезды называют гипергигантами. Гипергиганты — самые массивные, яркие и одновременно самые редкие и короткоживущие из всех известных звезд. Типичная масса гипергиганта — 120 масс Солнца и более, вплоть до 200-250 масс Солнца. Типичный гипергигант имеет массу в 6 раз большую, чем Ригель. По размерам гипергиганты не больше сверхгигантов, однако, они намного тяжелее. Масса гипергигантов приближаются к теоретическому пределу для звезд, по сути, они находятся на грани перехода к возникновению черной дыры, поэтому крайне неустойчивы.

Процессы, которые проходят во время очень короткой жизни этих огромных звезд, просто грандиозны. Светимость гипергигантов превышает 500 тысяч светимостей Солнца, а часто она составляет миллионы светимостей Солнца. Типичный гипергигант более чем в десять раз ярче сверхгиганта Ригеля. Температура поверхности гипергигантов сильно различается — она может быть как 3200 К, так и 35 000 К. Гипергиганты имеют очень низкую продолжительность жизни — в среднем она составляет один-два миллиона лет (максимум — несколько миллионов), а у особо крупных звезд даже сотни тысяч лет. В нашей Галактике такие массивные звезды — исключительная редкость (их насчитывается около десяти).

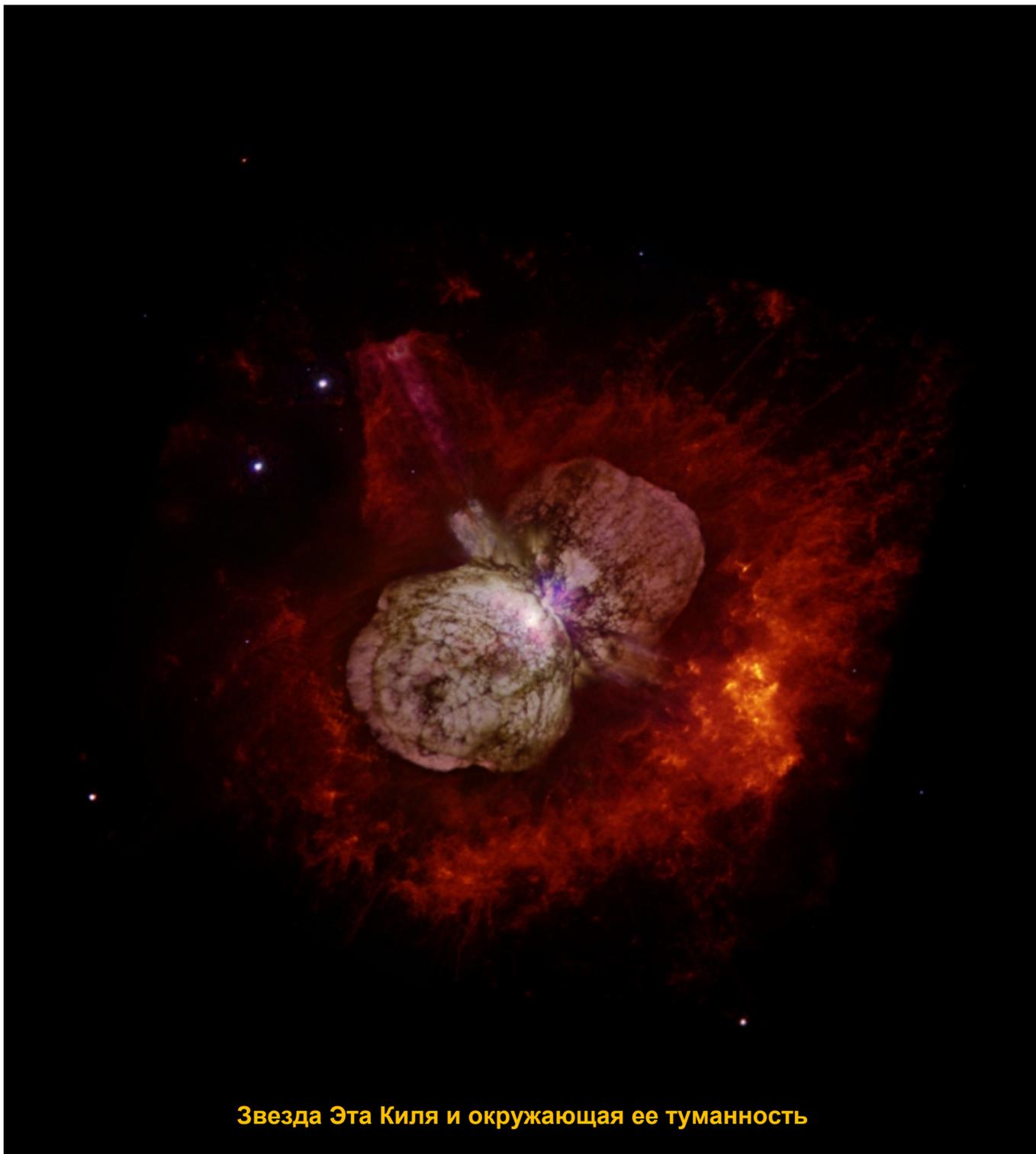
Приведем несколько примеров. Звезда S Золотой Рыбы имеет светимость в 500000 раз большую, чем наше Солнце. Нетрудно подсчитать, что S Золотой Рыбы излучает $500000 \cdot 3.846 \cdot 10^{26} = 1.9 \cdot 10^{31}$ Вт энергии, что эквивалентно взрыву каждую секунду $1.9 \cdot 10^{31} / 4.184 \cdot 10^{15} = 4.5 \cdot 10^{15}$ (четыре с половиной миллиона миллиардов) водородных бомб по 1 Мт ТНТ.

Но и это не предел. Одной из самых ярких, больших и неустойчивых звезд считается Эта Киля (η Киля, Форамен, η Car, η Carinae), которая находится на расстоянии в 7500-8000 световых лет от Солнца. Это яркий голубой гипергигант, который к тому же является переменной звездой. Масса η Киля составляет 100-150 масс Солнца, светимость примерно 4-5 миллионов солнечных светимостей. Абсолютная звездная величина η Киля составляет -12^m , это означает, что на расстоянии в 10 парсек³ η Киля была бы такой же яркой, как на земном небе полная Луна. Для сравнения: Солнце с такого расстояния можно было бы лишь с трудом увидеть невооруженным глазом (абсолютная звездная величина нашего Солнца $+4.83^m$).

Эта Киля настолько огромна, что ее фотосфера не в состоянии удерживаться гравитацией звезды и «сдувается» излучением в окружающее пространство. Яркость

³ 1 парсек (пк) = $3.08568 \cdot 10^{13}$ км = 3.2616 световых лет.

звезды очень сильно меняется со временем. Например, в 1820 г началось резкое увеличение яркости звезды, и в апреле 1843 г она стала второй по яркости на небе после Сириуса. Потом яркость упала в сотни раз, и к 1870 звезда стала невидимой невооруженным глазом. При вспышке 1841-1843 г вокруг звезды образовалась небольшая биполярная туманность Гомункул. Масса пыли в Гомункуле составляет около 0.04 массы Солнца, всего во время вспышки, как предполагается, было сброшено несколько масс Солнца. Считается, что звезда должна скоро взорваться, превратившись в сверхновую.



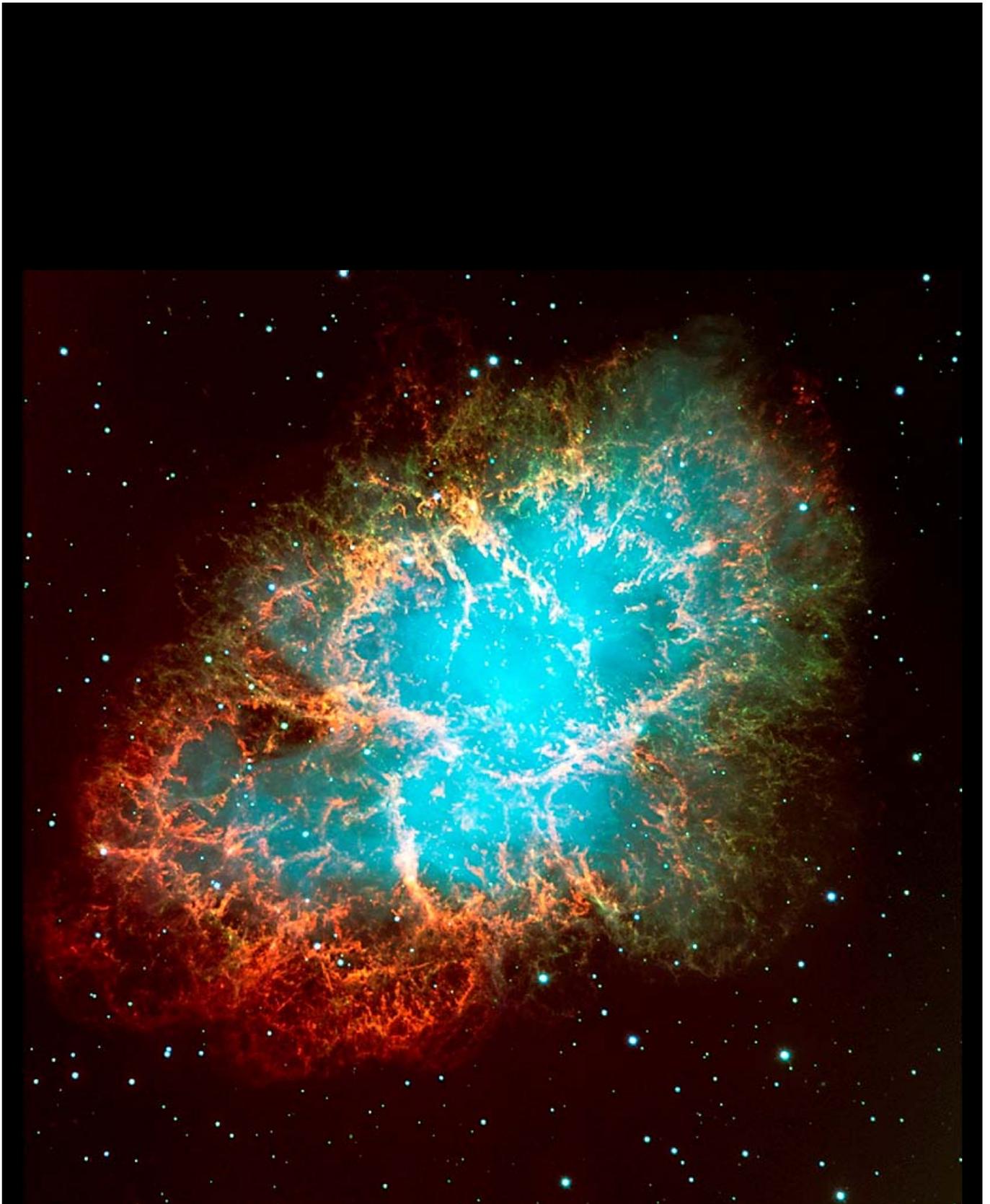
Звезда Эта Киля и окружающая ее туманность

Что такое сверхновая звезда? Когда массивная звезда исчерпывает запас водорода, в ее недрах начинают сливаться ядра гелия, затем углерода и более тяжелых элементов. В результате термоядерного синтеза в центре звезды накапливаются все более и более тяжелые элементы. Термоядерные реакции с участием элементов начиная с железа и никеля уже не дают выигрыша энергии, поэтому ресурсы звезды исчерпываются. Под действием гравитации ядро звезды все больше сжимается, пока в один прекрасный момент электроны не вдавливаются в протоны с образованием нейтронов. После этого ядро просто «схлопывается» – происходит коллапс. Выделяется огромное количество энергии. Сначала оболочка звезды устремляется вовнутрь, но потом отскакивает от плотного ядра и расширяется наружу. Возникает колоссальная ударная волна, оболочка сверхновой сбрасывается со скоростью порядка 10000 км/с. После вспышки остается расширяющаяся туманность, в центре которой находится нейтронная звезда или черная дыра.

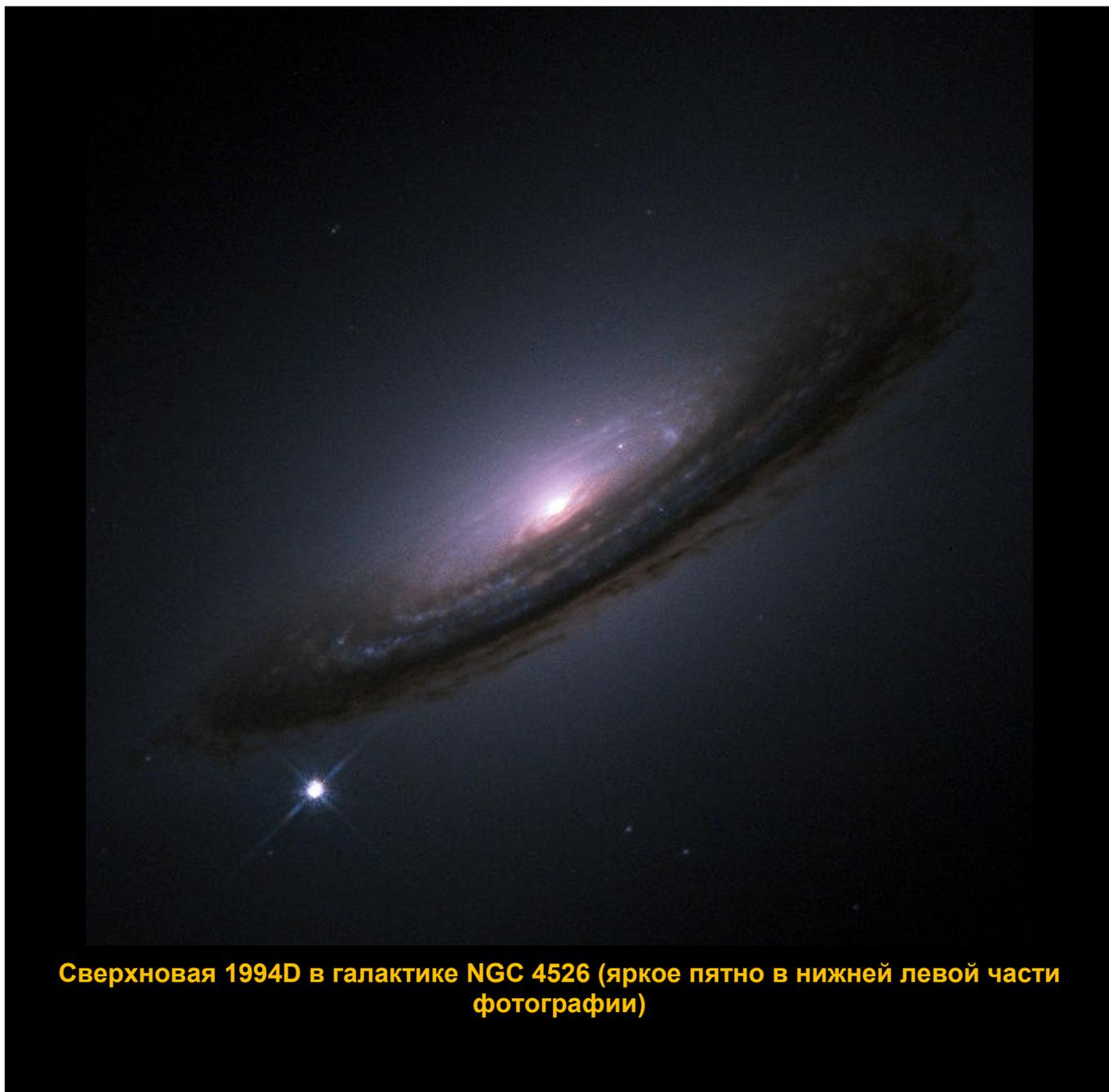


Вспышки сверхновых – один из самых мощных природных процессов. В считанные секунды сверхновая звезда может высвободить в сотни раз больше энергии, чем способно выработать наше Солнце за все 10 миллиардов лет своей жизни. Сверхновая может излучать больше, чем все звезды галактики вместе взятые. При вспышке сверхновой выделяется энергия порядка 10^{43} - 10^{44} Дж. Такая огромная энергия рождается в ядре диаметром несколько десятков километров.

Каждый год удается зафиксировать около десяти вспышек сверхновых в далеких галактиках. Сверхновая звезда взрывается примерно раз в 100 лет в галактике размером с Млечный Путь.



**Крабовидная туманность - остаток взрыва сверхновой, которая вспыхнула
в 1054 г.**



Сверхновая 1994D в галактике NGC 4526 (яркое пятно в нижней левой части фотографии)

Вспышки сверхновых звезд – мощные катастрофы, масштабы которых мы не в состоянии представить. Перефразируя высказывание одного философа можно сказать: «Человек – очень плохая мера всех вещей». Однако во Вселенной существуют явления еще более грандиозные, чем взрывы сверхновых. Это квазары, слияние нейтронных звезд и черных дыр, столкновения галактик. Такие явления очень неудобно выражать в тротиловом эквиваленте, поскольку мегатонны и гигатонны ТНТ – слишком уж мизерная единица. Мы планируем вернуться к некоторым из этих явлений в следующих номерах журнала.