

## Акустические способы оценки энергии мощных взрывов

Ю. И. Лобановский

Все следует упрощать до тех пор, пока это возможно, но не более того.

А. Эйнштейн

### Краткое содержание

Двумя независимыми акустическими способами – по длине пробега акустической волны и по частоте концентрации максимальной энергии волны – подтверждены результаты ранее выполненных расчетов энергии взрыва Челябинского метеороида. По акустическим оценкам получена величина энергии этого взрыва, близкая к 57 мегатоннам. Первый из способов, также как и оценки по сейсмическим характеристикам, подтвердил расчетную энергию взрыва Тунгусского метеороида на уровне 14.0 – 14.5 мегатонн. Кроме того, получено отличное согласование между акустическими оценками и иными данными по энергии взрывов еще одного метеороида, прекратившего свое существование над южной частью Индийского океана, и двух катастрофических взрывов вулканов – Безымянного и Кракатау.

*Ключевые слова: Челябинский метеороид – Тунгусский метеороид – Царь-бомба – вулкан – Безымянный – Кракатау – Тамбора – взрыв – энергия – волна – инфразвук – пробег – частота*

### Таблица символов

$c$  – скорость ударной или звуковой волны  
 $E$  – энергия  
 $H$  – высота  
 $L$  – пробег волны  
 $p$  – давление  
 $R$  – радиус  
 $k$  – коэффициент влияния высоты взрыва на длину максимального пробега волны  
 $\xi$  – число регистраций инфразвуковой волны  
 $\nu$  – частота

### Индексы

$m_{ax}$  – максимальный  
 $e$  – взрывной  
 $a$  – акустический  
\* – характерный

## I. Введение

В работах [1 – 3] на основе регулярной физико-математической процедуры были представлены результаты вычислений энергии взрывов, произошедших в результате торможения в атмосфере Земли Тунгусского и Челябинского метеороидов, которые, как показывает анализ их характеристик, принадлежат к одному семейству кометных обломков [4]. Эти вычисления были проведены в марте 2013 года. После того, как были получены уточненные данные о Челябинском инциденте, эти расчеты были проведены заново [5]. Они показали, что Тунгусский метеороид взорвался на высоте около 8.25 км, а энергия его взрыва составила около 14.5 Мт. Взрыв Челябинского метеороида был почти в 4 раза мощнее – 57 Мт, однако в связи с тем, что он произошел на высоте в 3.4 раза большей – около 28 км, его воздействие на подстилающую поверхность в радиусе 50 км было менее сильным, чем у Тунгусского взрыва. При этом, чем ближе к эпицентру взрывов, тем относительно слабее было воздействие много более мощного, но значительно более высотного Челябинского взрыва по сравнению с Тунгусским. В эпицентре перепад давления на ударной волне от взрыва Челябинского метеороида оказался в 7.5 раз ниже, чем у Тунгусского, и поэтому серьезных разрушений от Челябинского взрыва на поверхности земли не было. Самый значительный материальный ущерб от него (не считая деформаций, а иногда и разрушений оконных и дверных конструкций и различных ворот, а также сильных повреждений двух крупных сооружений в Челябинске) состоял в том, что им было разбито около 0.2 км<sup>2</sup> оконных стекол [6].

Все эти результаты являются прямым следствием основных закономерностей движения небесных тел, их взрывного распада при входе в атмосферу и распространения в ней ударных волн, а также данных по стеклам, разбитым зимой 2013 года, и деревьям, поваленным летом 1908 года. Эти закономерности опираются на законы сохранения и, в принципе, довольно просты. Так что и имеющиеся в работах [1 – 3]

результаты представлялись их автору довольно-таки очевидными. Однако, к некоторому его удивлению, они вдруг подверглись ожесточенным нападкам со стороны тех, кому эта очевидность показалась потрясением основ. А ведь эти «основы» были сформированы средствами массовой информации по скороспелым суждениям некоторых исследователей метеороидов, числившихся авторитетами, но ставших заложниками абсолютно новой для них ситуации, когда масштаб явления оказался много больше того, к чему они ранее привыкли.

В связи с этим представляется целесообразным проделать простые и понятные практически любому человеку оценки энергии, в первую очередь, Челябинского взрыва на основе подходов, принципиально отличных от использованных в работах [1 – 5]. В настоящее время это стало возможным в связи с появлением в Интернете информации об акустических характеристиках Челябинского взрыва [7, 8]. Эти данные были не слишком полны, однако для оценок и их оказалось вполне достаточно.

## II. Оценка энергии взрывов по длине пробега инфразвуковой волны

Вначале рассмотрим информацию о длине пробега в атмосфере Земли звуковой волны, вызванной Челябинским взрывом. Ее частота была очень низка – порядка 0.03 Гц, поэтому она не воспринималась на слух, но была зафиксирована мировой сетью инфразвуковых станций [8]. Эта инфразвуковая волна при ее распространении в атмосфере Земли была трижды зарегистрирована в Гренландии [8] на расстоянии 5.0 мегаметров (тысяч километров) от эпицентра взрыва на инфразвуковой станции I18DK Международной системы мониторинга (см. рис. 1), расположенной в окрестностях американской авиабазы Туле. Таким образом, длина пробега этой волны оказалась не менее 85 мегаметров [7].

Известно, что на больших дистанциях высота канала распространения инфразвуковых волн доходит примерно до 110 километров [9, 10]. Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с горизонтальными характерными размерами земной атмосферы, составляющими, как минимум, 20 мегаметров – половину длины окружности Земли. Поэтому, в отличие от случая малых расстояний от центра взрыва, когда дистанция  $R$ , на которой возникает заданный перепад давления на ударной волне, определяется как

$$R \sim E_e^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где  $E_e$  – энергия взрыва [11], на таких больших расстояниях в силу двумерности процесса распространения волны можно записать

$$L \sim E_e^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где для дистанции пробега волны используется символ  $L$ , поскольку в этой ситуации она уже теряет характер радиального расстояния от центра взрыва (или эпицентра, которые в данном масштабе уже не различаются).

Из формулы (2) следует, что при прочих равных условиях максимальная длина пробега звуковой волны  $L_{\max}$  в первом приближении пропорциональна энергии взрыва в степени  $\frac{1}{2}$ . Тогда, имея, например, соответствующие характеристики некоего «базового» взрыва с энергией  $E^*$  и максимальной длиной пробега инфразвуковой волны  $L^*$ , энергии любых других взрывов можно оценить по максимальным длинам пробега их звуковых волн, на которых волна еще регистрируется стандартным датчиком давления:

$$E_a = E^* \left( \frac{L_{\max}}{L^*} \right)^2 \quad (3)$$

Здесь  $E_a$  – энергия взрыва по акустическим оценкам.

Тогда при сравнении очень мощных взрывов разной физической природы возможных проблем может быть только две: их различные энергетические спектры, а также влияние разных высот взрывов. Как известно, при ядерном взрыве на первичное и запаздывающее ионизирующие излучения, которых нет у других рассматриваемых здесь видов взрывов, расходуется до 15 % его энергии, при этом на первичное излучение приходится только треть этой доли [12]. Однако, обычно энергию вторичного излучения вообще не засчитывают в тротиловый эквивалент ядерного заряда, а у чисто термоядерного взрыва вторичного ионизирующего излучения нет. Поэтому в данном случае все несколько упрощается. В качестве одной из базовых точек здесь был взят самый мощный рукотворный термоядерный взрыв так называемой Царь-бомбы (АН-602), который был произведен Советским Союзом 30 октября 1961 года на полигоне Сухой Нос Новой Земли [13]. Там только 2.5 % энергии приходилось на «запальный» ядерный заряд, так что энергией

вторичного излучения у этого взрыва и оставшейся долей первичного ионизирующего излучения в 5 % в этих приближенных оценках можно пренебречь.

Кроме того, некоторое возможное снижение доли энергии светового излучения и, соответственно, возрастание доли энергии ударной волны при тепловом взрыве типа Челябинского по сравнению с аналогичным термоядерным взрывом вследствие более низкой температуры огненного шара на начальной стадии его развития, должно компенсироваться влиянием высоты взрыва. Чем больше высота, тем меньше плотность воздуха, и тем меньшая доля энергии взрыва переходит в энергию ударной волны. А небесные тела обычно взрываются выше, чем это было у термоядерных зарядов при их атмосферных испытаниях, исключая сравнительно небольшое число высотных и космических взрывов. При высоте взрыва 28.2 км как у Челябинского метеороида, плотность воздуха оказывается там в 33.5 раза ниже, чем при высоте взрыва Царь-бомбы, составившей 4.2 км [13, 14]. Так что есть все основания ожидать, что при акустическом пересчете параметров Новоземельского взрыва на параметры Челябинского взрыва по формуле (3), не учитывающей влияние высоты, энергия последнего окажется даже заниженной.

Сообщалось, что волна от Новоземельского взрыва трижды обошла вокруг Земли [15]. В реальности это означает, что на Земле были инфразвуковые станции, которые ее трижды зафиксировали (кроме того, они дважды должны были зафиксировать волну, пришедшую с противоположного направления). Из того, что расстояние между полигоном Сухой Нос на Новой Земле и островом Чатем, где расположена новозеландская инфразвуковая станция I36NZ Международной системы мониторинга (МСМ) [16], на которой в соответствии с источником [17] эта волна была зарегистрирована в последний раз, составляет 15.8 мегаметров, измеренная длина ее максимального пробега составила не менее 95.8 мегаметров.

Для того чтобы учесть влияние высоты взрыва, в качестве другой точки отсчета возьмем данные по самому мощному взрыву болида из серии акустических наблюдений ВВС США над десятью болидами, проведенной в 1960 – 1974 годах. Этот взрыв с энергией около 1.1 мегатонны произошел 8 марта 1963 года над юго-западом Индийского океана вблизи его границы с Атлантическим океаном в точке 51° южной широты и 24° восточной долготы примерно в 1800 км южнее мыса Игольный – крайней южной точки Африки. По данным источника [18] инфразвуковая волна была зарегистрирована на Азорских островах на удалении 11.3 мегаметра от эпицентра взрыва (инфразвуковая станция I42PT МСМ). Его высота не сообщалась, но именно в релизе ВВС США говорится о том, что «обычно, метеороиды разрушаются на высотах от 30 до 45 км над земной поверхностью, однако некоторые проникают в атмосферу до высот около 20 км» [19]. Так что этот Южный метеороид, безусловно, взорвался намного выше, чем Царь-бомба, и так как он был очень крупным, можно ожидать, что высота его взрыва была достаточно близкой к нижней границе диапазона, указанного в релизе.

Все эти данные, а также величины энергий взрывов приведены в таблице 1, где  $E_c$  – энергия взрыва в мегатоннах,  $E_a$  – ее оценка через максимальные длины пробега волны  $L_{max}$  по формуле (3), измеренные в мегаметрах. По определению, для базового взрыва  $E_a = E_c = E^*$ . Энергия Новоземельского взрыва была взята из источника [13], энергия Челябинского взрыва – из источника [5].

**Таблица 1**

N	Взрыв	Год	H (км)	$L_{max}$ (Мм)	$E_a$ (Мт)	$E_c$ (Мт)
1	Новоземельский	1961	4.2	95.8	58	58
2	Южный	1963	–	11.3	0.81	1.1
3	Челябинский-1	2013	28.2	85	46	57
4	Челябинский-2	2013	28.2	85	62	57
5	Челябинский-3	2013	28.2	85	54	57

Отклонение энергии взрыва Южного болида по акустической оценке, полученной по формуле (3) из энергии взрыва Царь-бомбы, составило около – 26 %, что также свидетельствует о его значительной высоте. Из таблицы 1 видно, что пересчет по формуле (3) энергии Челябинского взрыва с низковисотного Новоземельского взрыва Царь-бомбы (вариант Челябинский-1) приводит к величине 46 Мт (отклонение равно – 19 %), а с висотного Южного взрыва (вариант Челябинский-2) – к величине 62 Мт (отклонение равно + 9 %). Среднее значение этих двух оценок (Челябинский-3) – 54 Мт, что только на 3 Мт (на 5 %) отличается от величины, полученной расчетами, данные о которых приведены в работе [5].

Таким образом, можно полагать, что при учете влияния высоты взрывов рассматриваемый акустический метод оценки их энергии может быть вполне приемлемым по точности. Так как влияние высоты является хоть и достаточно заметным, но не слишком сильным, в первом приближении учтем его с помощью простейшей линейной аппроксимации. Тогда формула (3) может быть преобразована следующим образом:

$$E_a = E^* \left( \frac{L_{\max}}{L^* - kH} \right)^2, \quad (4)$$

где  $H$  – высота взрыва, а  $k$  – коэффициент влияния его высоты на длину максимального пробега инфразвуковой волны. Итак, из соотношения (4) при заданных характерных значениях  $E^*$ ,  $L^*$  и коэффициента  $k$ , а также при известной длине пробега инфразвуковой волны можно получить акустическую оценку энергии взрыва  $E_a$ , ее вызвавшего, вне зависимости от природы этого взрыва.

К трем уже рассмотренным здесь взрывам добавим еще три: взрывы Тунгусского метеороида [5] и вулканов Безымянный и Кракатау. При Тунгусском взрыве ударная волна была дважды зарегистрирована в Лондоне [20, 21], удаленном от эпицентра почти на 6 мегаметров, что и отображено в строке 4 таблицы 2. В середине XX века был еще один очень крупный инцидент с известными параметрами – катастрофический взрыв («lateral blast») камчатского вулкана Безымянный [22]. Его энергия оценивалась в  $5 \cdot 10^{16}$  джоулей [23], что примерно равно 12 Мт. В источнике [21] была указана максимальная длина пробега волны при этой природной катастрофе.

**Таблица 2**

N	Взрыв	Год	H (км)	$L_{\max}$ (Мм)	$E_a$ (Мт)	$E_e$ (Мт)
1	Новоземельский	1961	4.2	95.8	59.7	58.0
2	Челябинский	2013	28.2	85	56.8	56.8
3	Южный	1963	34.9	11.5	1.1	1.1
4	Тунгусский	1908	8.25	46	14.2	14.4
5	Камчатский	1956	3.1	42.5	11.7	12
6	Зондский	1883	1.5	415	1100	1090

Используя формулу (4) и метод наименьших квадратов, определим значения параметров  $E^*$ ,  $L^*$  и  $k$ , которые приводят к наименьшим расхождениям величин энергий  $E_a$  и  $E_e$  во всех рассматриваемых точках, кроме Южного болида, так как высота его взрыва была неизвестна. Тогда значения базовых параметров в формуле (4) оказались следующими: характерная величина энергии взрыва  $E^* = 59.6$  Мт, длина пробега волны на уровне моря  $L^* = 97.2$  Мм и коэффициент влияния высоты  $k = 360$ . Если высота измеряется в километрах (км), а пробег звуковой волны в мегаметрах (Мм),  $k = 0.36$ . Величины высот и энергий взрывов во всех 6 случаях представлены в таблице 2. Среднеквадратичное отклонение акустических оценок энергии взрывов от исходных данных не превышает 2 %.

На основе этих результатов можно сделать вывод, что акустические оценки энергии не очень высотных Тунгусского и Камчатского тепловых взрывов по формуле (4) прекрасно согласуются с ранее имевшимися расчетными данными. При этом оценка энергии Тунгусского взрыва по сейсмограммам приводит к величине его энергии  $12.5 \pm 2.5$  Мт, а по барограммам –  $12 \pm 2.5$  Мт [24], что также находится в хорошем согласии с приведенными в таблице 2 величинами. То же можно сказать и о высоте взрыва – 8.5 км из того же источника отличается от расчетного значения 8.25 км (см. таблицу 2) только на 0.25 км [25].

В случае Южного болида 1963 года из равенства  $E_a = E_e$  была определена предполагаемая высота его взрыва. Так как в окрестностях Азорских островов не было другой инфразвуковой станции, длина пробега инфразвуковой волны от его взрыва вполне могла быть заметно больше, чем дальность ее реальной регистрации – 11.3 Мм. И именно для таких сравнительно коротких пробегах погрешности такого рода из-за относительной редкости сети инфразвуковых станций особенно велики. Поэтому длина пробега волны была округлена до 11.5 Мм, и уже именно в таком виде она использовалась в дальнейшем анализе. При этом высота взрыва получилась приблизительно равной 35 км. То есть оценка высоты взрыва Южного болида достаточно близка к нижней границе диапазона типичных высот взрывов болидов по данным ВВС США, которая, видимо, и была определена на основе данных серии наблюдений, включающей это событие. При увеличении длины пробега на 0.1 Мм оценка высоты взрыва Южного болида снижается на 1.9 км. Так что в реальности эта высота вполне могла быть несколько ниже.

При наиболее вероятной скорости входа объекта в атмосферу 17 км/с в соответствии с результатами работы программного модуля расчета воздушных взрывов космических объектов [26] энергия взрыва в 1.1 Мт на высоте 35 км достигается для мини-астероида, состоящего из хондритов с плотностью  $3000 \text{ кг/м}^3$ , при диаметре 39 м и массе 92 кт. При этом угол его входа должен был составлять около  $6.9^\circ$ , почти как у Челябинского метеороида ( $7.2^\circ$ , см. [5]). Если же это был снежно-ледяной обломок кометы плотностью  $570 \text{ кг/м}^3$ , то его диаметр должен был быть равным 57 м, масса – 55 кт при угле входа около  $15^\circ$ . Так что приблизительные оценки характеристик Южного болида и параметров его взрыва представляются вполне адекватными, и его основные параметры также представлены в таблице 2. При этом, если реальная высота взрыва была ниже, то угол входа Южного болида был больше.



### III. Оценка энергии взрыва по частоте концентрации максимальной энергии

Оценим теперь энергию Челябинского взрыва еще одним акустическим способом. Стало известно, что акустическая «энергия Челябинского взрыва была сконцентрирована на (частоте) 0.03 Гц», см. [8]. Более поздние и значительно более подробные данные из источника [31] показывают, что эта частота была равна  $0.030 \pm 0.007$  Гц. Очевидно, что источником ударной волны, затем посредством рассеивания энергии во все большем пространстве переходящей волну акустическую, является так называемый огненный шар взрыва. Не вдаваясь в детали процесса можно просто считать источник возмущений полуволновой дипольной антенной. Тогда длина излучаемой ею волны будет равна удвоенному ее размеру. Максимальный радиус огненного шара Царь-бомбы  $R_{\max}$  составлял 4.6 км [13]. Скорость волны  $c$  в этот момент составляет вне зависимости от энергии взрыва примерно 0.54 км/с [32] – меняется только расстояние, на котором она достигается. Тогда частота волны  $\nu^*$  равна

$$\nu^* = \frac{c}{4R_{\max}} \quad (5)$$

Подставив в формулу (5) числовые значения Новоземельского взрыва, получим, что  $\nu^* = 0.029$  Гц, что только на 3 % отличается от среднего значения частоты с максимальной энергией у Челябинского взрыва. Таким образом, это согласование расчетной и экспериментальной частот в очередной раз подтверждает примерное равенство энергий Челябинского и Новоземельского взрывов.

Так как в рассматриваемом масштабе все размеры, связанные с взрывом, по крайней мере, в первом приближении пересчитываются по формуле (1) [11], а скорость ударной волны в момент остановки роста огненного шара не зависит от энергии взрыва, по имеющимся экспериментальным данным формула (5) может быть преобразована к виду, типичному для эмпирических формул, относящихся к взрывам:

$$\nu^* = 0.116 E_e^{-\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где частота  $\nu^*$  измеряется в герцах, а энергия взрыва  $E_e$  – в мегатоннах. По-видимому, формула (6) может давать оценку частоты с максимальной энергией с точностью не хуже 20 – 30 %. Было бы неплохо верифицировать ее по результатам всех 10 испытаний мощных атмосферных термоядерных взрывов с энергией не менее 10 Мт, которых в Советском Союзе было произведено еще 7, кроме взрыва Царь-бомбы [33], а в США – 2 [34, 35]. Впрочем, были еще 2 советских взрыва в диапазоне энергий 5 – 10 Мт [33] и 1 американский [36], данные о которых были бы не менее полезны для верификации. В каких-то архивах эта информация, вероятно, еще имеется.

### IV. Приложение: Определение энергии Зондского взрыва

В известных источниках информации при достаточно твердо заявленной кратности (7 – 11 раз) регистрации акустического сигнала от взрыва в Зондском проливе [27, 28], имеются огромные расхождения в оценках энергии этого взрыва. В Википедии, в которой, обычно, представлены наиболее широко распространенные мнения, говорится о том, что энергия взрыва вулкана Кракатау составляла, якобы, 200 Мт (0.2 Гт) в тротиловом эквиваленте, и она в 4 раза больше энергии взрыва Царь-бомбы на Новой Земле [27]. Однако в другом источнике энциклопедического характера утверждается, что при взрыве Кракатау выделилось 1.5 Гт энергии в тротиловом эквиваленте [37]. В то же время в издании, опубликованном Американским геологическим обществом, утверждается, что «энергия крупнейшего естественного взрыва за историческое время – взрыва Кракатау в 1883 году, оценивается в  $10^{24}$  эрг» [38], то есть  $10^{17}$  Дж или 24 Мт, что в 2.5 раза меньше, чем у Царь-бомбы!

И одновременно практически общепризнанным считается, что взрыв вулкана Тамбора 10 апреля 1815 года [39] был в 4 раза мощнее, чем, якобы, «крупнейший естественный взрыв» Кракатау. Для этого взрыва начала XIX века известны оценки энергии в 20 Гт [37] и в 24 Гт [40], что должно приводить к значениям энергии в 5 – 6 Гт для взрыва Кракатау. Более того, в документальном фильме о катастрофическом извержении вулкана Тамбора «Год без лета» один уважаемый вулканолог сообщает, что «...мощность взрыва в 3 миллиона раз превышала мощность взрыва в Хиросиме» [41], то есть составляла около 45 Гт. Это, в принципе, еще удваивает оценку энергии взрыва и в Зондском проливе до 10 – 12 Гт. Итак, ясно, что вулканологам за прошедшие 130 лет не удалось определить его энергию, так как крайние их оценки расходятся почти в 500 раз! Эти расхождения кажутся чрезмерными даже для такой весьма неточной науки, как вулканология, и после этого даже 120-кратная ошибка в определении энергии Челябинского взрыва (см. [1, 2, 5]) уже не кажется чем-то выходящим из ряда вон. В связи с этим энергия взрыва вулкана Кракатау была самостоятельно вычислена автором данной работы, а описание этого процесса расчета дано ниже.

Как уже упоминалось ранее, физическая природа взрыва играет незначительную роль в формировании и развитии вызванной им ударной волны. Если условия, при которых происходят взрывы, одинаковы, то и ударные волны от них распространяются в атмосфере практически одинаково вне зависимости от того, являлся ли взрыв термоядерным, был ли он вызван входом в атмосферу небесного тела или взрывным извержением вулкана. Конечно, в малой окрестности вулкана условия, при которых происходит взрыв, сильно отличаются от тех, которые имеют место быть при воздушном термоядерном взрыве или атмосферном разрушении метеороида, так как вулкан формирует иные граничные условия самим своим существованием как огромной горы. Однако, на расстояниях много больших характерного размера вулкана эти различия, как следует из любых волновых теорий, нивелируются. Кроме того, взрыв быстро двигавшегося в атмосфере метеороида происходит при почти полной его остановке, и, если исключить из рассмотрения влияние баллистической ударной волны, то он достаточно близок к осесимметричному взрыву практически неподвижного боезаряда с аналогичной энергией (см. [1 – 3, 5]), особенно на больших расстояниях от точки взрыва.

Дополнительным аргументом того, что «ночью все кошки серы» является сравнение первых 5 рассмотренных в таблице 2 статьи взрывов: вне зависимости от их физической природы во всех случаях имеется прекрасное согласование как самих энергий, так и их оценок через характеристики звуковой волны. А ведь звуковая волна – это просто предельный случай ударной волны. Кроме того, упрощенное «квазистатическое» рассмотрение взрывного распада небесных тел в программном модуле расчета воздушных взрывов таких объектов [26] в данной ситуации оказывается не недостатком, а достоинством, позволяя оценивать с его помощью результаты воздействия на подстилающую поверхность любых «воздушных взрывов» – от метеороидных до вулканических. Необходимо только рассчитать вход в атмосферу некоего «виртуального метеороида», распад которого приводит к взрыву с заданной энергией на заданной высоте.

То, что при моделировании последствий различных взрывов можно выбирать любые подходящие характеристики этого «виртуального метеороида» и условия его входа, добиваясь только нужных высоты и энергии взрыва, является простым следствием алгоритма модуля [26]. Таким образом, этот простой приближенный модуль с помощью метода «виртуальных метеороидов» можно использовать для оценок влияния на подстилающую поверхность взрывов любой природы при условии того, что дистанция, на которой происходит оценка, много больше размера взрывающегося объекта.

Таким способом и была рассчитана энергия Зондского взрыва, то есть катастрофического извержения вулкана Кракатау, произошедшего 130 лет назад, в августе 1883 года. В качестве граничных условий, определяющих энергию взрыва на заданной высоте 1.5 км, использовались данные о стеклах, разбитых в Батавии (Джакарте) [28, 42] и радиусе вывала деревьев в экваториальных лесах по берегам пролива [28]. Было рассмотрено большое количество вариантов, и результаты пяти из них, наиболее представительных, можно видеть в таблице 3. Здесь  $p$  – перепад давления (избыточное давление) на ударной волне в килопаскалях на удалении  $L$  от эпицентра взрыва, измеренном в километрах вдоль поверхности земли и указанном в столбце слева от столбца перепада давления,  $\xi$  – кратность регистраций инфразвуковой волны, приходящей по кратчайшему направлению от взрыва.

Таблица 3

N	Взрыв	$L_1$ (км)	$P_1$ (кПа)	$L_2$ (км)	$P_2$ (кПа)	$L_3$ (км)	$P_3$ (кПа)	$E_e$ (Мт)	$\xi$
1	<b>Зондский-1</b>	29.0	30.0	130	3.2	155	2.6	200	5
2	<b>Зондский-2</b>	36.5	30.0	130	4.2	155	3.4	400	7
3	<b>Зондский-3</b>	49.3	30.0	130	6.4	155	5.0	1040	11
4	<b>Зондский-4</b>	50.0	30.0	130	6.5	155	5.1	1090	11
5	<b>Зондский-5</b>	51.5	30.0	130	6.8	155	5.3	1200	12

Дистанция  $L_1$  – это радиус зоны лесоповала на ровной открытой местности. Несмотря на то, что имеются только качественные оценки размера этой зоны – в источниках говорится о «воздушной волне», «которая повалила экваториальные леса на побережье Зондского пролива» [28], сама топография Зондского пролива и окрестностей острова Кракатау превращает это качественное утверждение в количественное. Побережье Зондского пролива с севера образовано берегами острова Суматра, а с юга и востока – берегами острова Ява (см. рис. 2). Минимальное расстояние от эпицентра взрыва до северо-западного берега Суматры составляет 41.0 км, до северо-восточного – 36.4 км, а до восточного берега Явы – 47.2 км. Таким образом, для того, чтобы ударная волна Зондского взрыва могла хотя бы «зацепить» краешек тропических лесов на обоих берегах пролива, необходимый для лесоповала перепад давления на волне в 30 кПа (см. [1, 2, 5]) должен был достигаться на расстоянии не менее 48 – 49 км от эпицентра взрыва. Дистанция  $L_1 = 50$  км

изображена на рис. 2 красной линией, эпицентр взрыва – точка у основания метки 1. Непоказанные на этом рисунке участки окружности радиуса 50 км приходятся на океан, и джунглей там нет.

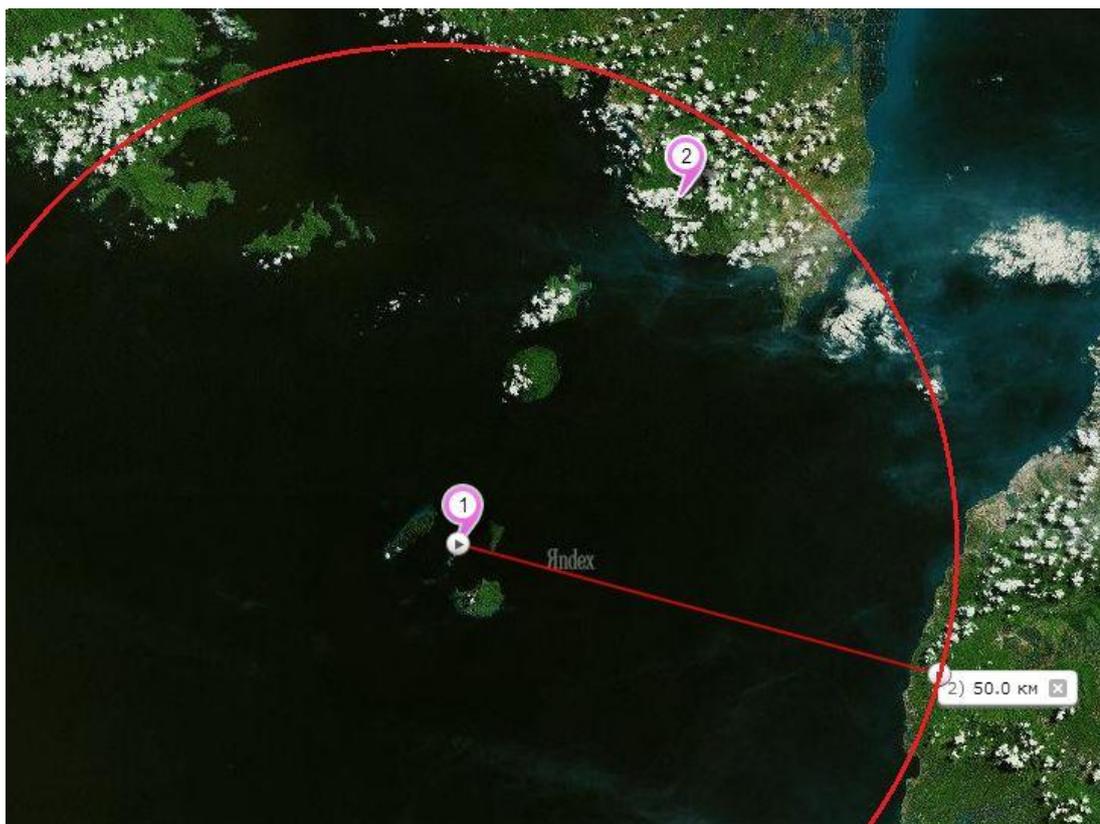


Рис. 2

В документальном фильме канала Дискавери о событии, а также в публикациях, опирающихся на отчет очевидца катастрофы Р. Вербеека, говорится следующее: «ударная волна выбила стекла в радиусе 130 км» [43], «извержение выбивало стекла на расстоянии 150 км от его источника» [42], «в радиусе 150 км воздушной волной были разбиты все окна» [44], «воздушная волна ... срывала крыши с домов и двери с петель в Джакарте на расстоянии 150 км от места катастрофы» [28]. Дистанция  $L_3 = 155$  км – это примерное расстояние от эпицентра взрыва до основного европейского района Батавии (Джакарты) – столицы голландской Ост-Индии (Индонезии) XIX века, находившегося недалеко от современной центральной площади Джакарты Медан Мердека [45, 46]. Дистанция  $L_2 = 130$  км – это расстояние до пригородных поселений вокруг Батавии – сейчас с запада от Джакарты (с направления прихода ударной волны) там расположены город-спутник Тангеранг и аэропорт.

Ясно, что первые 3 утверждения более-менее согласуются между собой и с реальной топографией Батавии того времени, а четвертое – из Википедии им несколько противоречит, как будто бы преувеличивая разрушения в городе (правда и третье утверждение тоже описывает несколько более существенные последствия взрыва в центре Батавии по сравнению с двумя первыми). Но статья в русской Википедии – это в лучшем случае третичный обзор вторичных источников и, минимум, после двойного перевода – с голландского языка на английский и с английского на русский, а такое увеличение числа передаточных инстанций часто приводит к искажению интерпретации или даже смысла сообщения. Таким образом, анализ всех этих данных приводит к следующей картине разрушений от ударной волны Зондского взрыва: в европейских кварталах Батавии, примерно на расстоянии 155 км от его эпицентра была разбита заметная часть стекол, а в пригородных поселениях на расстоянии порядка 130 км были разбиты практически все стекла, а также, возможно, были повреждены некоторые легкие и непрочные двери и крыши, характерные для тропических построек. Это должно означать, что на дистанции  $L_2$  перепад давления на волне был около 7 кПа, а на дистанции  $L_3$  – около 5 кПа. Вместе с условием границы лесоповала на дистанции  $L_1 = 50$  км (перепад давления 30 кПа), имеем 3 граничных условия для определения единственного неизвестного параметра – энергии Зондского взрыва, так как возможное изменение высоты взрыва на 100 – 200 м практически на нее не влияет. Таким образом, при определении энергии взрыва по любому из трех граничных условий остальные два могут использоваться для оценки степени согласования полученного решения с наблюдавшимися при катастрофе явлениями.

Рассмотрим теперь результаты расчетов, представленные в таблице 3. Вариант 1 соответствует энергии взрыва из Википедии – 200 Мт. Видно, что никакого вывала джунглей ни на одном из берегов Зондского пролива при такой энергии взрыва быть не могло – даже до ближайшего северо-восточного мыса Суматры ударная волна нужной интенсивности не доходила бы целых 7.5 км. И в Батавии не могло быть массового разбития стекол, не говоря уже о выбивании дверей.

При реализации варианта 2 с энергией взрыва 400 Мт появляется возможность семикратной фиксации инфразвуковой волны от взрыва одним чувствительным барографом, что соответствует минимальному числу ее регистраций, описанному в источниках [27, 28]. Однако и этой энергии взрыва явно не хватает для того, чтобы в окрестностях Кракатау могло произойти то, что наблюдалось в августе 1883 года. Ударная волна с требуемым для лесоповала перепадом давления только «касается» пляжа на кратчайшем направлении до берега на северо-восток. И в Батавии массовое разбитие стекол представляется практически невозможным.

В варианте 3 с энергией взрыва 1040 Мт на дистанции 155 км перепад давления достигает 5 кПа, при этом на 130 км этот перепад ниже 7 кПа менее чем на 10 %, а расстояние до границы лесоповала меньше заданной дистанции всего лишь на 700 м. Так что, с учетом приближенности расчетного алгоритма и некоторой условности номинальных граничных условий, можно полагать, что вариант 3 им удовлетворяет, и эта энергия взрыва близка к минимально возможной по данным наблюдений.

Вариант 4 с энергией взрыва 1090 Мт удовлетворяет номинальному граничному условию лесоповала, и отлично согласуется с тем, что происходило в Батавии. А вариант 5 с энергией взрыва 1200 Мт в целом выглядит уже несколько чрезмерным, особенно, если принять во внимание и излишнюю длину пробега вызванной им инфразвуковой волны. Таким образом, из проведенных расчетов можно сделать вывод, что энергия Зондского взрыва была близка к величине  $E_c = 1.09 \pm 0.05$  Гт, что почти в 50 раз выше минимальных и в 10 раз ниже максимальных его оценок, приведенных в известных источниках. Если же отбросить явно маргинальные крайности, то полученная величина примерно в 5 раз больше минимальных и в 5 раз меньше максимальных оценок, то есть оказалась практически в центре всего этого поля разбросов ранее сделанных предположений об энергии Зондского взрыва. Следует отметить, что подход, аналогичный описанному здесь, при оценке энергии взрыва вулкана Тамбора приводит к величине  $E_c = 5.4 \pm 0.3$  Гт, что в 4.9 раза больше, чем в случае взрыва Кракатау. Это практически совпадает с общепринятыми оценками соотношения энергий взрывов вулканов Тамбора и Кракатау, полученных, видимо, из объемов выброшенных при этом продуктов извержений – около  $100 \text{ км}^3$  и  $20 \text{ км}^3$  соответственно [27, 28, 40, 41, 44].

Стоит упомянуть здесь также и о вулкане Райябаса – горе, одиноко стоящей на побережье Суматры в 42 км от Кракатау [47] (расположение этого вулкана обозначено на рис. 2 меткой 2). Она находилась внутри номинальной зоны лесоповала недалеко от ее границы. Эта гора экранировала от ударной волны область, лежавшую со стороны, противоположной Кракатау, создавая так называемую «аэродинамическую тень», и резко снижая там воздействие этой волны на местность. На таком расстоянии от эпицентра взрыва перепад давления на волне на открытой местности составлял бы около 41 кПа (при  $E_c = 1.09$  Гт). Даже уменьшение его в 1.5 раза приводило бы к прекращению сплошного лесоповала. Так что джунгли в зоне «тени» должны были сохраниться.

И действительно, до сих пор, по описанию индонезийского туриста, побывавшего на вершине горы Райябаса около 4 лет назад, оттуда хорошо виден незакрытый деревьями пляж, а противоположные морю (и Кракатау) склоны горы оказались плотно заросшими деревьями [48]. Так что даже спустя век с четвертью после катастрофы граница вывала леса, смещенная ближе к эпицентру на 8 км, то есть, примерно, на  $\frac{1}{6}$  от ее номинального удаления, из-за существования огромного препятствия – горы высотой почти в 1.3 км, хорошо заметна до сих пор. В этой зоне ударной волной не была разрушена даже лесная хижина известного из истории катастрофы семейства Бейрингов [43], а ведь полное разрушение деревянных домов обычно происходит при давлении фронта ударной волны от 20 до 30 кПа [32]. И с учетом этого резкого сокращения территории лесоповала на самом близком к эпицентру взрыва участку суши, было бы трудно вообще говорить о волне, «которая повалила экваториальные леса на побережье Зондского пролива» при энергиях взрыва Кракатау меньших, чем указанные здесь.

## Выводы

1. Двумя независимыми акустическими способами подтверждено ранее полученное расчетное значение энергии взрыва Челябинского метеороида, составляющее 57 Мт.
2. Первый из этих способов, как и оценки по сейсмическим характеристикам и барограммам, подтвердил и расчетную энергию взрыва Тунгусского метеороида на уровне 14.0 – 14.5 Мт.

3. Получено также отличное согласование между акустическими оценками и иными данными по энергии взрывов еще одного метеороида и двух катастрофических взрывов вулканов – Безымянного и Кракатау.

### Литература

1. Ю. И. Лобановский – Параметры Челябинского и Тунгусского объектов и характеристики вызванных ими взрывов. *Synerjetics Group*, 12.04.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/objects.htm>
2. Yu. I. Lobanovsky – Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *Arxiv.org*, 08.07.2013 // <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
3. Ю. И. Лобановский – Оценка адекватности условий на ударной волне вдали от эпицентра взрыва. *Synerjetics Group*, 19.04.2013 // <http://synerjetics.ru/article/border.htm>
4. Ю. И. Лобановский – Два семейства обломков одной кометы и их родители. *Synerjetics Group*, 24.04.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/families.htm>
5. Ю. И. Лобановский – Уточненные параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и характеристики их взрывов. *Synerjetics Group*, 26.01.2014 // [http://www.synerjetics.ru/article/objects\\_2.htm](http://www.synerjetics.ru/article/objects_2.htm)
6. Т. Хан – Интервью с Владимиром Пучковым. *Спасатель. МЧС России*. 25.02.2013 // <http://spasatel-mchs.ru/edition/51432/document836703/>
7. A. Le Pichon, L. Ceranna et al – The 2013 Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophysical Research Letters*, **40**, issue 14, 28.07.2013 // <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50619/abstract>
8. K. Allen – Chelyabinsk fireball: Canadian scientists still sizing it up. *Thestar.com, World*, 12.04.2013 // [http://www.thestar.com/news/world/2013/04/12/chelyabinsk\\_fireball\\_canadian\\_scientists\\_still\\_sizing\\_it\\_up.html](http://www.thestar.com/news/world/2013/04/12/chelyabinsk_fireball_canadian_scientists_still_sizing_it_up.html)
9. O. Popova, I. Nemchinov – Bolids in the Earth Atmosphere. *In Book: Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer, 2008 // <http://confessedtravelholic.com/doc/download-ebook-Catastrophic-Events-Caused-by-Cosmic-Objects-pdf-amazon-304051.html>
10. A. Y. Fernandez, O. C. Jalabert – Infrasonidos y Ondas Acústicas de Gravedad. *Universidad Austral de Chile, Valdivia*, 2002 // <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmficp821i/doc/bmficp821i.pdf>
11. Физика взрыва, под ред. Л. П. Орленко, т. 1. Москва, Физматлит, 2002 // <http://padabum.com/d.php?id=20818>
12. Распределение энергии, выделяемой при ядерных взрывах. *Ядерное оружие* // <http://vault-13.ru/t2/c24/>
13. Царь-бомба. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
14. 1976 Standard Atmosphere Calculator // <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
15. В. Б. Адамский, Ю. Н. Смирнов – 50-мегагонный взрыв над Новой Землей. *Отечественный Атомный проект: события и люди* // [http://www.wsyachina.narod.ru/history/50\\_mt\\_bomb.html](http://www.wsyachina.narod.ru/history/50_mt_bomb.html)
16. IMS Infrasound Network. *DTRA Verification Database* // <http://www.rdss.info/infrastat/network/map.html>
17. E. Farkas – Transit of Pressure Waves through New Zealand from the Soviet 50 Megaton Bomb Explosion. *Nature*, **193**, 765 – 766, 24.02.1962.
18. D. O. Re Velle – Historical Detection of Atmospheric Impacts by Large Bolides Using Acoustic-Gravity Waves. *International Symposium on Near-Earth Objects, United Nations/Nations/Explorers Club*, New York City, April 24 – 26, 1995. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **822** // <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997NYASA..822..284R>
19. New Releases. *US Air Force* // <https://www.fas.org/irp/agency/aftac/news/index.html>
20. Л. А. Кулик – Данные по Тунгусскому метеориту к 1939 году. *ДАН СССР*, **XXII**, N 8, 1939 // <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/bib/1930-39/1939/1939-01/?print=on>
21. А. В. Золотов – Проблемы Тунгусской катастрофы 1908. г. Минск, «Наука и техника», 1966 // <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/zo1/5/24/?print=on>
22. Безымянный (вулкан). *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Безымянный\\_\(вулкан\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Безымянный_(вулкан))
23. Г. С. Горшков – Извержение сопки Безымянной (Предварительное сообщение). *АН СССР, Бюллетень вулканологической станции*, N 26, 1956 // [http://www.kscnet.ru/ivs/publication/art\\_bezym/1956.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/publication/art_bezym/1956.pdf)
24. A. Ben-Menahem – Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, **11**, no. 1, 1975 // <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
25. V. Svetsov, V. Shuvalov – Tunguska Catastrophe of 30 June 1908. *In Book: Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer, 2008 // <http://confessedtravelholic.com/doc/download-ebook-Catastrophic-Events-Caused-by-Cosmic-Objects-pdf-amazon-304051.html>
26. R. Marcus, H. J. Melosh, G. Collins – Earth Impact Effects Program. *Imperial College (London), Purdue University* // [http://impact.ese.ic.ac.uk/cgi-bin/crater.cgi?dist=20&diam=17&pdens=1000&pdens\\_select=0&vel=18&theta=30&tdens=&tdens\\_select=3000](http://impact.ese.ic.ac.uk/cgi-bin/crater.cgi?dist=20&diam=17&pdens=1000&pdens_select=0&vel=18&theta=30&tdens=&tdens_select=3000)

27. Krakatoa. *Wikipedia* // <http://en.wikipedia.org/wiki/Krakatoa>
28. Кракатау. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/wiki/Кракатау>
29. И. А. Резанов – Великие катастрофы в истории Земли. Москва, Наука, 1984 // <http://www.twirpx.com/file/629113/>
30. IMS Infrasound Network. *Natural Resources Canada* // [http://can-ndc.nrcan.gc.ca/is\\_infrasound-eng.php](http://can-ndc.nrcan.gc.ca/is_infrasound-eng.php)
31. P. G. Brown et al – A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, **503**, no 7475, 14.11.2013 // <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
32. Атмосферный ядерный взрыв. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный\\_ядерный\\_взрыв](http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв)
33. Хронология ядерных испытаний СССР (1949 – 1962). *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Хронология\\_ядерных\\_испытаний\\_СССР\\_\(1949—1962\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Хронология_ядерных_испытаний_СССР_(1949—1962))
34. Ivy Mike. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Ivy\\_Mike](http://en.wikipedia.org/wiki/Ivy_Mike)
35. Castle Bravo. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Castle\\_Bravo](http://en.wikipedia.org/wiki/Castle_Bravo)
36. Operation Dominic 1962. *Janes's Oceania Home Page* // [http://www.janeresture.com/christmas\\_bombs/operation\\_dominic\\_1962.htm](http://www.janeresture.com/christmas_bombs/operation_dominic_1962.htm)
37. Earth Science: An Illustrated Guide to Science. Chelsea House Publishers, 2006 // [http://geology.lnu.edu.ua/phis\\_geo/fourman/library-Earth/Earth%20Science%20An%20Illustrated%20Guide%20to%20Science.pdf](http://geology.lnu.edu.ua/phis_geo/fourman/library-Earth/Earth%20Science%20An%20Illustrated%20Guide%20to%20Science.pdf)
38. E. Jones, J. Kodis – Atmospheric Effects of Large Body Impacts: The First Few Minutes. In: *Geological Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth*. The Geological Society of America, Special Paper 190, 1982 // <http://books.google.ru/books?id=efz87W88HawC&pg=PA175&lpg=PA175&dq=krakatau+%221024+ergs%22&source=bl&ots=9KOfFcf1I0&sig=88S1Lh0OuKoPPQ5r-HIGGIjJTY&hl=en&sa=X&ei=MaI0UrXUD-fl4AP0goDYBQ&ved=0CD8Q6AEwA#w#v=onepage&q=krakatau%20%221024%20ergs%22&f=false>
39. Mount Tambora. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Mount\\_Tambora](http://en.wikipedia.org/wiki/Mount_Tambora)
40. В. И. Ваганов и др. – Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. Москва, Недра, 1985.
41. The Year without Summer. A *Cicada Film for Discovery Channel*, 2003 // <http://www.downloadprovider.me/download-k:The-Year-Without-Summer.html?aff.id=1299>
42. R. Hoblitt, C. Dan Miller, W. Scott – Volcanic Hazards with Regard to Siting Nuclear-Power Plants in the Pacific Northwest. US Department of the Interior Geological Survey, Open-File Report 87-297. 1987 // <http://pubs.usgs.gov/of/1987/0297/report.pdf>
43. Моменты истории: Извержение Кракатау. *Terra Nova Television, Discovery Channel* // [http://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=E8Sj6LvyUPo#t=2878](http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=E8Sj6LvyUPo#t=2878)
44. А. В. Викулин – Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский, КамчатГТУ, 2008 // [http://www.kscnet.ru/ivs/monograph/vikulin\\_2/](http://www.kscnet.ru/ivs/monograph/vikulin_2/)
45. Голландская Ост-Индия. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Голландская\\_Ост-Индия](http://ru.wikipedia.org/wiki/Голландская_Ост-Индия)
46. Джакарта. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/Джакарта>
47. Rajabasa. *Wikipedia* // <http://en.wikipedia.org/wiki/Rajabasa>
48. F. Seponada – Misteri Gunung Rajabasa, 2009 // <http://wisata.kompasiana.com/jalan-jalan/2009/12/29/misteri-gunung-rajabasa-45270.html>

Москва  
20.07.2013 – 10.02.2014

Ю. И. Лобановский