

О ВОЗМОЖНОСТИ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ВЫБРОСА ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЗРЫВАХ СВЕРХНОВЫХ

Ю.Л. Ратис, И.А. Селезнева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В работе проделана оценка вероятности влияния взрывов Сверхновых на образование эруптивных комет в системах планет-гигантов. Показано, что одним из возможных результатов взрыва Сверхновой может стать образование радиоактивных космических тел, падение которых на Землю приводит катастрофам. В частности, Тунгусское космическое тело с высокой степенью вероятности является отдаленным последствием взрыва Сверхновой, в результате которого образовалась Крабовидная туманность.

Введение

История сохранила довольно значительное число хроник и даже научных трактатов, содержащих описание вспышек сверхновых в нашей Галактике. Так, например, сохранился ряд китайских хроник, в которых рассказывается о появлении на небе в июле 1054 г. «звезды-гостя». Эта звезда была настолько ярка, что ее видели даже днем; по своему блеску она превосходила Венеру – самое яркое светило неба после Солнца и Луны. Несколько месяцев звезда была видна невооруженным глазом, а потом постепенно погасла.

Через семь с половиной веков французский астроном Шарль Мессье, составляя знаменитый каталог туманностей, под №1 (туманность М1) поместил объект необычайной формы.

Впоследствии этот объект получил название «Крабовидная туманность»¹. Фотографии этой туманности, приведены выше. Длительные наблюдения показали, что Крабовидная туманность медленно расширяется. Поскольку расстояние до этой туманности превышает 2000 пс, то заметное, хотя и медленное, увеличение ее размеров на небе означает, что скорость разлета образующих ее газов огромна. Она достигает 1500 км/с, в то время как скорость движения обычных газовых туманностей в Галактике редко превышает 20-30 км/с. Только чудовищной силы взрыв звезды мог сообщить огромной массе газа столь высокую скорость.

Некоторые свойства Крабовидной туманности

На основании данных астрономических наблюдений за Крабовидной туманностью можно заключить, что приблизительно 950 лет назад вся она была сосредоточена в очень малом объеме. Поскольку Крабовидная туманность находится как раз в той области неба, где некогда вспыхнула удивительная «звезда-гостя», наблюдаемая скорость расширения доказывает, что эта туманность не что иное, как ос-

таток грандиозной космической катастрофы – вспышки сверхновой, которая произошла в 1054 году.

В 1949 г. было обнаружено, что Крабовидная туманность является мощным источником радиоизлучения. Оказалось, что радиоволны излучают сверхэнергичные электроны, движущиеся в магнитных полях, находящихся в этой туманности.

При вспышке сверхновой звезды образуется огромное количество частиц сверхвысоких энергий – космических лучей. Применяя теорию «синхротронного» излучения релятивистских электронов, по измеренному потоку радиоизлучения и известным расстояниям и размерам Крабовидной туманности удалось оценить плотность космических лучей. Если учесть, как часто вспыхивают сверхновые звезды в Галактике, то образующихся при этих вспышках космических лучей оказывается достаточно для заполнения ими всей Галактики с наблюдаемой плотностью.

Таким образом, вспышки сверхновых звезд являются одним из основных источников пополнения Галактики космическими лучами; кроме того, они обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами. Это имеет огромное значение для эволюции звезд и всей Галактики в целом.

Крабовидная туманность обладает еще одной удивительной особенностью. Ее оптическое излучение, по крайней мере, на 95%, обусловлено также сверхэнергичными электронами, т.е. имеет «синхротронную» природу. Энергия электронов, излучающих в оптическом диапазоне длин волн, в сотни раз больше энергии электронов, излучающих радиоволны. Она достигает 10^{11} - 10^{12} эВ. На основе теории оптического излучения Крабовидной туманности удалось предсказать, что это излучение должно быть поляризованным. Наблюдения полностью подтвердили этот вывод. В настоящее время синхротронное оптическое излучение обнаружено еще у нескольких объектов, преимущественно радиогалактик. Его исследование имеет очень большое значение для астрономии и физики.

В 1963 г. удалось обнаружить довольно мощное рентгеновское излучение от Крабовидной туманности. В следующем, 1964 г., во время покрытия этой туманности Луной удалось показать, что этот источник рентгеновского излучения является протяженным, хотя его угловые размеры в 5 раз меньше

¹ М1 или Крабовидная туманность – остаток сверхновой июля 1054-го года. Сверхновая была видна отчетливо даже днем в течение нескольких недель. Остаток взорвавшейся звезды – первый открытый пульсар. Теперь известно, что эта нейтронная звезда вращается с периодом 33 миллисекунды. Туманность светит ярче 750 000 Солнц. Расстояние от Земли: около 6 500 световых лет (2 000 парсеков). Размер туманности: около 7 световых лет (2,2 парсека). Прямое восхождение: 5ч 32м. Склонение: +22°00', видимая звездная величина: 11,3.

угловых размеров «Краба». Следовательно, рентгеновское излучение испускает не звезда, некогда вспыхнувшая как сверхновая, а сама туманность. Несомненно, рентгеновское излучение Крабовидной туманности имеет также синхротронную природу и обусловлено ультрарелятивистскими электронами с энергией порядка 10^{13} - 10^{14} эВ.

Существует несколько гипотез о причине вспышек сверхновых. Однако общепризнанной теории, основывающейся на известных фактах и могущей предсказать новые явления, пока нет. Одна из таких гипотез была высказана в работе [1]. Она, в какой-то степени, проливает свет на возможную взаимосвязь взрыва Сверхновой, породившего Крабовидную туманность, с рождением эруптивных комет (кометы Энке, в частности) и Тунгусским феноменом.

Более традиционная точка зрения на проблему Сверхновых стоит в том, что после исчерпания водородного горючего из центральной части звезды образуется весьма горячее и плотное ядро. Сама звезда при этом превращается в красный гигант, а затем, после «сброса» оболочки - в белый карлик. Но такой путь эволюции могут проделать только звезды, у которых массы, оставшиеся после сброса оболочки, не слишком велики, например не больше 1,2 солнечной массы. Звезды, у которых оставшаяся масса находится в пределах 1,2-2,5 солнечных масс, не могут превратиться в белого карлика. Они катастрофически быстро сжимаются до ничтожных размеров порядка 10 км, и превращаются в нейтронные звезды (их средняя плотность достигает 10^{15} г/см³, что превышает плотность атомного ядра). На стадии образования температура поверхности у нейтронных звезд составляет около миллиарда градусов. В дальнейшем нейтронная звезда быстро остывает, а температура ее поверхности быстро падает.

Высокая температура поверхности нейтронных звезд, образовавшихся после взрыва сверхновых, позволяет обнаружить их рентгеновское излучение.

Так, еще в 1963 г. в созвездии Скорпиона был открыт первый рентгеновский источник, находящийся за пределами Солнечной системы. Вскоре было открыто рентгеновское излучение от Крабовидной туманности. В настоящее время известно уже несколько тысяч рентгеновских источников, причем многие из них отождествляются с туманностями - остатками вспышек сверхновых. Но настоящая сенсация случилась чуть позже начала систематических исследований новых и сверхновых звезд.

Почти 40 лет назад было сделано открытие, «как гром среди ясного неба» превратившее таинственные нейтронные звезды в наблюдаемые объекты. Речь идет об открытии пульсаров, едва ли не самом впечатляющем открытии в астрономии XX века.

Первый пульсар открыли случайно в 1967 г. астрономы Кембриджского университета аспирантка Джоселин Белл Барнел и ее руководитель профессор Энтони Хьюиш. Но отнюдь не случайным было то, что пульсары открыли именно эти ученые: именно они создали и в те дни испытывали новый

радиотелескоп с уникальной аппаратурой для регистрации быстропеременного космического излучения. Правда, причиной переменности предполагались мерцания радиосигналов от далеких галактик и квазаров, проходящих сквозь неоднородности межзвездной и межпланетной плазмы. Но когда вместо хаотически меняющихся сигналов ученые неожиданно обнаружили цепочки импульсов, приходящих с четкой периодичностью, они поняли, что натолкнулись на совершенно новое явление.

Д. Белл и Э. Хьюиш, исследовали множество возможных причин периодичности радиосигналов (в том числе и прием сигналов врезного разума). Но единственно разумное объяснение явления состояло в том, что источником периодических импульсов служат быстро вращающиеся нейтронные звезды², существование которых было предсказано физиками-теоретиками еще в 1939 г.

Вслед за радиопульсарами аналогичные объекты были обнаружены в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах. Исследования показали, что все пульсары представляют собой сильно намагниченные, быстро вращающиеся нейтронные звезды.

У каждого из пульсаров свой период пульсаций. Он лежит в диапазоне от 640 импульсов в секунду, до одного импульса за 5 сек.

Энергия, излучаемая в импульсах, составляет лишь малую долю энергии, непрерывно излучаемой пульсаром. Строгая периодичность импульсов является следствием вращения пульсара. Вращение же служит источником излучаемой энергии; это следует из того, что промежутки между импульсами у всех пульсаров медленно возрастают (т.е., вращение звезды замедляется).

Первый пульсар ученые назвали **CP1919**, что значит «кембриджский пульсар» (*Cambridge Pulsar*), имеющий прямое восхождение в 19 час 19 мин. Сразу после открытия пульсаров, в их поиски включились крупнейшие радиообсерватории мира, давая обнаруженным объектам обозначения по своим каталогам. К 1975 г. было обнаружено 150 пульсаров. Для унификации все пульсары стали обозначать буквами **PSR** с указанием прямого восхождения (до минут) и склонения (до градуса).

Теперь первый пульсар имеет обозначение **PSR 1919 + 21**; он имеет период 1.3373 секунды и длительность импульса 0.037 секунд. Наиболее детально исследован пульсар **PSR 0531 + 21**, распо-

² За открытие радиопульсаров Э. Хьюишу (А. Hewish) в 1974 г. была присуждена Нобелевская премия в разделе физики «за пионерские исследования в области радиофизики». В решении Нобелевского комитета особо отмечалась решающая роль, которую Э. Хьюиш сыграл в открытии пульсаров. Представляя лауреатов, Ханс Вильгельмсон из Шведской королевской академии заявил: «Радиоастрономия предоставляет уникальную возможность исследовать то, что происходит, а в действительности происходило очень давно, на огромных расстояниях от Земли. Хьюиш сыграл решающую роль в открытии пульсаров. Это открытие, представляющее необычайный научный интерес, проложило путь к новым методам исследования вещества в экстремальных физических условиях».

ложенный в Крабовидной туманности. Эта нейтронная звезда делает 30 оборотов в секунду (период пульсара 0,033 сек).

Радиоастрономы всего мира продолжают поиски пульсаров в нашей Галактике, и в соседних галактиках. В ноябре 1998 г. в Паркской обсерватории (Австралия) был открыт 1000-й радиопульсар.

Может ли взрыв Сверхновой вызвать катастрофу на Земле?

Вспышку сверхновой на месте Крабовидной туманности в созвездии Тельца наблюдали на Земле в 1054 года. Но, какое отношение все это имеет к земным событиям?

Ниже будет обоснована гипотеза о том, что взрывы Сверхновых могут приводить к образованию эруптивных комет в других звездных системах, а эруптивные кометы, в свою очередь, могут порождать метеорные потоки, в состав которых входят геофизические (и электрофонные) метеориты, к каковым, относится в частности, Тунгусское космическое тело.

Для того чтобы приводимые ниже оценки носили конкретный характер, далее мы будем говорить только о Крабовидной туманности и эруптивных кометах Юпитера.

Приведем аргументы в пользу сформулированной гипотезы. При взрыве сверхновой огромное количество вещества разгоняется до субсветовых скоростей. В состав этого вещества входят тяжелые элементы.

Одна из гипотез о природе Сверхновых приведена в работе [1]. Эта гипотеза дает ключ к пониманию того, каким образом достаточно большая масса сильнорадиоактивных веществ (не обязательно урана) могла разогнаться до субсветовых скоростей.

Именно несимметричный выброс макроскопического количества вещества из взорвавшейся звезды раскрутил дочерний пульсар до чудовищной по величине угловой скорости, что согласуется с наблюдательными данными.

Склонение туманности **M1** составляет **22°**. То есть, если осколок от взрыва Сверхновой вошел в Солнечную систему, то шел он на субсветовой скорости, а его траектория лежала в плоскости, составляющей с плоскостью эклиптики не слишком большой угол. В этом случае даже осколок, имевший относительно небольшую массу, мог выбить из Юпитера достаточно массивную комету.

Удельная энергия (в расчете на один нуклон) в налетающем фрагменте (ударнике) была настолько высока, что само столкновение ударника с Юпитером вызвало небывалой мощи³ ядерные реакции.

Эти реакции могли быть самых разных типов. Но для реакций с тяжелыми и сверхтяжелыми ионами в области промежуточных энергий (~500 МэВ/нуклон)

весьма характерны реакции фрагментации, при которых выделяется значительное количество энергии. А происходили упомянутые реакции в мегаобъеме вещества, находящегося в поверхностном слое Юпитера.

При этом произошел нестандартный по механизму, но огромный по мощности взрыв. Грубая оценка его мощности может быть сделана в предположении, что на каждый нуклон, входивший в состав ударника, выделилась энергия порядка 1 МэВ. В этом случае общее количество выделившейся энергии составило приблизительно **10²⁵ Дж**, что в сто миллионов раз больше, чем при Тунгусском взрыве. В тротиловом эквиваленте это соответствует ядерному взрыву мощностью примерно в **2000 гигагадонн!!!**

Но еще больший вклад энергии в вещество Юпитера внес сам ударник, поскольку его кинетическая энергия по порядку величины составляла **5·10²⁷ Дж**. О тротиловом эквиваленте умолчим, поскольку **10¹⁵ тонн тротила** – это немыслимо много, хотя и составляет менее одной миллиардной доли массы Юпитера.

При взрыве малая доля этого, воистину космического, запаса энергии выплеснулась из недр Юпитера вместе с кометой Энке. Только такой мощи взрыв мог привести к извержению (эрупции) кометы из недр планеты-гиганта. Ведь кинетическая энергия кометы Энке, по самым скромным подсчетам, имела порядок **2·10²³ Дж**.

Несложные расчеты показывают следующее: с учетом поправок на то, что энергия нужна не только на разгон небесного тела, но и на работу по преодолению силы тяжести, комета Энке унесла с собой примерно **0,01%** той энергии, которую принес с собой осколок Сверхновой из Крабовидной туманности. В общем, это даже не К.П.Д. паровоза.

Остальная энергия, выделившаяся при столкновении, пошла на нагревание атмосферы и недр планеты-гиганта⁴.

Можно только поражаться запасу прочности Юпитера. Этот гигант при столкновении отделался лишь извержением кометы. При таком ударе космического тела о Землю произошло бы полное разрушение планеты.

Возможно, что образование большинства эруптивных комет систем Юпитера, Сатурна и Нептуна происходило по сценариям, сходным со сценарием рождения кометы Энке.

Сама собой напрашивается гипотеза о том, что естественный спутник Земли, Луна, и пояс астероидов на месте гипотетической планеты Фаэтон, образовались в результате космических катастроф, аналогичных той, что описана выше.

А вот теперь самое время поверить алгеброй гармонию...

³ Речь идет только об общей массе вещества, испытавшего ядерные превращения, и о суммарной энергии, выделившейся при этом. Если говорить о физике процесса, то это, в основном, прямые ядерные реакции.

⁴ Оценки и выводы, приведенные в п1-п16, сделаны мною на основе астрономических данных. Кроме того, при оценке масштаба анализируемых явлений использовались результаты вычислений, приведенных ниже.

На основании вышесказанного дадим верхнюю оценку массы вещества, извергнутого «Крабом», а также оценим основные параметры осколка-ударника, столкнувшегося с Юпитером. Для этого предположим, что весь момент импульса пульсар получил за счет выброса одного большого фрагмента. В силу закона сохранения момента импульса, мы имеем:

$$L_{\text{pulsar}} = L_{\text{frag}}$$

где L_{pulsar} (L_{frag}) – момент импульса пульсара (фрагмента). Согласно законам классической механики $L_{\text{pulsar}} = I\omega$, где I – момент инерции пульсара, а ω – его угловая скорость. Очевидно, что при расчете величины L_{pulsar} можно пренебречь релятивистскими эффектами. В этом случае все величины, входящие в выражение для L_{pulsar} , вычисляются элементарно: $\omega = \frac{2\pi}{T}$; $I = \frac{2}{5}MR_p^2$; $M = \frac{4}{3}\pi R_p^3\rho$; причем M – масса пульсара, R_p – его радиус, а ρ – средняя плотность.

Момент импульса фрагмента равен

$$L_{\text{frag}} = R_f \cdot p,$$

где p – асимптотическое значение импульса фрагмента, а R_f – его прицельный параметр. Кроме того, мы предположили, что фрагмент, из которого впоследствии выделился ударник, столкнувшийся с Юпитером, вылетел практически с поверхности пульсара ($R_f \approx R_p$)⁵.

Скорость вылетевшего фрагмента (v) велика (см. ниже), поэтому при расчете его импульса следует учесть релятивистские эффекты. Следовательно

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m – масса покоя фрагмента.

Численные значения всех параметров задачи хорошо известны из литературы. В частности: $\rho = 10^{18} \text{ кг/м}^3$, $v = 0,9 \cdot c$, $R_p = 10^4 \text{ м}$, $T = 0,033 \text{ с}$.

⁵ Речь идет только о порядковых оценках. Кроме того, не надо забывать, что R_f – это прицельный параметр, который может очень сильно отличаться от величины радиус-вектора фрагмента в момент его отделения от Сверхновой, поскольку в определении момента импульса входит еще и синус угла α между импульсом и радиус-вектором тела. Напомним, что прицельный параметр, по определению, есть величина проекции радиус-вектора на нормаль к направлению импульса тела. Проекция эта откладывается от центра системы (в данном случае, пульсара) до асимптотики траектории осколка. Все то же самое можно было бы записать в векторной форме: $\vec{L}_{\text{frag}} = [\vec{R}_{\text{frag}} \times \vec{p}_{\text{frag}}]$. В этом случае мы полагаем, что $R_f = R_{\text{frag}} \cdot \sin \alpha$, причем под \vec{p}_{frag} понимается асимптотический импульс осколка. И еще. Совершенно понятно, что гравитационное взаимодействие имеет неограниченный радиус действия. Поэтому все написанное в данном примечании следует принимать с необходимыми оговорками.

Простейшие оценки, выполненные для фрагмента, движущегося с субсветовой скоростью ($v = 0,9 c$), показывают, что

$$m \sim \frac{MR_p}{vT} \sim 10^{-3} M \approx 4 \cdot 10^{30} \text{ кг},$$

что вдвое больше массы Солнца $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$. Масса Юпитера, как известно, составляет $M_{\text{Jupiter}} = 1,9 \cdot 10^{27} \text{ кг}$, т.е. примерно в 1000 раз меньше, чем масса Солнца.

Предположим, что значительная доля импульса ударника (а до Юпитера долетела ничтожно малая часть $\Delta m \ll m$ от массы m , извергнутой Сверхновой из туманности M1) был передана комете Энке. Достаточно правдоподобная оценка массы кометы Энке (вместе с присоединенной массой метеорного потока β -Таурид) составляет примерно $M_{\text{Encke}} \sim 10^{-10} M_{\odot} \sim 10^{14} \text{ кг}$.

Для того чтобы выбитый фрагмент Юпитера мог преодолеть поле тяготения своего «родителя», ему необходимо сообщить начальную скорость порядка **60 км/с** за счет столкновения ударника с поверхностью планеты и передачи его импульса новорожденной комете.

Таким образом, для «обломка Краба», долетевшего до Солнечной системы, возникает вполне реальная оценка массы $\Delta m \sim 10^{10} \text{ кг}$, (**10 млн. тонн**), т.е. порядка одной сотой процента от полной массы кометы Энке, причем $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-21} - 10^{-20}$, что является ничтожно малой частью полной массы звездного выброса.

Очевидно, что эти оценки не противоречат ни законам физики, ни здравому смыслу. В частности, телесный угол, под которым виден диск Юпитера из Крабовидной туманности, составляет примерно $\Delta\Omega \sim 10^{-24} - 10^{-25}$ стерадиан. Это не так уж мало по космическим меркам, и с учетом неравномерности пространственного распределения потоков вещества, выброшенного из «Краба», соизмеримо с оценкой доли массы этого выброса, протаранившей Юпитер. Да и могучее гравитационное поле Юпитера здесь могло, хотя и незначительно, повлиять на ход событий.

Все это заставляет предположить следующее: эрупция (извержение) кометы Энке была вызвана столкновением осколка Сверхновой из Крабовидной туманности с Юпитером. И произошло это примерно так...

Земное эхо космических катастроф...

Взрыв Сверхновой на Земле наблюдали в 1054 году. Значит, по земному времени он произошел примерно 7500 лет тому назад, из которых 6500 лет свет от вспышки Сверхновой шел до Солнечной системы. Это означает, что если ударник, рожденный при взрыве Сверхновой, долетел от «Краба» до Юпитера в 1786 году (или чуть раньше), и выбил из

него комету Энке, то его (ударника) скорость составляла примерно **0,9 с** (90% скорости света). В этом случае в системе покоя ударника прошло всего лишь чуть более 3000 лет. Поэтому в нем могли уцелеть достаточно короткоживущие изотопы тяжелых элементов, например, ^{226}Ra , период полураспада которого составляет $T_{1/2} = 1602 \text{ г}$. Межзвездные расстояния также могли благополучно преодолеть такие радиоактивные изотопы, как ^{229}Th ($T_{1/2} = 7300 \text{ лет}$), ^{230}Th ($T_{1/2} = 75200 \text{ лет}$), ^{231}Pa ($T_{1/2} = 32000 \text{ лет}$).

Но наибольший интерес для нас представляют изотопы урана: ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , а также ^{238}U . Все эти изотопы, родившись в недрах Сверхновой, должны были дожить до встречи с Юпитером. То же самое касается трансурановых элементов, в частности, изотопов плутония: ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{242}Pu .

Кроме того, большое количество радиоактивных изотопов должно было родиться в результате столкновения ударника с Юпитером.

Заключение

Все перечисленные выше процессы привели к тому, что в веществе ядра кометы Энке оказалось запасено огромное количество внутренней энергии (ядерной энергии!). И то, что ядро этой кометы взорвалось вскоре после ее обнаружения – очень примечательный факт. Не исключено, что взрыв был ядерным!

А радиоактивные осколки, состоящие из тяжелых элементов (уран и пр.), родившихся во всех перечисленных выше катастрофах космического масштаба, рухнули вблизи таежной речки Кова.

Так родилась скандально известная «Чертова поляна»...

А до фактории Вановара долетели только фрагменты ядра Тунгусского космического тела (ТКТ), имеющие меньшую (по сравнению с ураном) плотность, и содержащие достаточное количество нейтронноизбыточных короткоживущих β^- -активных изотопов. В первую очередь, радиофосфора и радиоалюминия⁶.

Именно эти короткоживущие β^- -активные компоненты вещества ТКТ, после испарения и ионизации, взорвались в виде гигантских шаровых молний, учинив в районе Подкаменной Тунгуски бесчисленные безобразия, подробно описанные в научной и уфологической литературе.

И произошло это в полном соответствии с теорией цепных субатомных реакций индуцированного β^- -распада в связанное состояние, подробно изложенной в работе [1].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE).

Авторы выражают особую благодарность ректорату Самарского государственного аэрокосмического университета, а также Фонду содействия экономическому развитию СГАУ (Фонду Лукачева) за финансовую поддержку.

Авторы благодарят В.А. Сойфера, Н.Л. Казанского, В.И. Фурмана, И.П. Завершинского, В.С. Казакевича, В.В. Ленивкина, Л.В. Туманова за многочисленные стимулирующие дискуссии, в результате которых на свет появилась эта работа.

Литература

1. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое квантовое явление // Монография, СГАУ, ИСОИ РАН, Изд. СНЦ РАН, Самара, 2004. 132 с.

⁶ Иридия, скандия, индия, фосфора и пр. под Ванаварой тоже выпало предостаточно, но это были стабильные изотопы.

