



International Journal of Geosciences > Vol.16 No.1, January 2025

Low Energy Nuclear Synthesis in Earthquake, Volcanic Eruptions, and Genesis of Heavy Elements

Alexander Vol^{1*}, Arie Lev Gilat²

¹Independent Researcher, Rehovot, Israel.

²Geological Survey of Israel (Ret.), Independent Researcher, Modiin, Israel.

DOI: 10.4236/ijg.2025.161005

Международный журнал наук о земле > Том 16, № 1, январь 2025 г.

Низкоэнергетический ядерный синтез при землетрясениях, извержениях вулканов и образование тяжёлых элементов

Александр Вол^{1*}, Ари Лев Гилат²

¹Независимый исследователь, Реховот, Израиль.

²Геологическая служба Израиля (в отставке), независимый исследователь, Модиин, Израиль. DOI: 10.4236/ijg.2025.161005

Абстракт

1989 год — начало интенсивных исследований явления холодного ядерного синтеза, переименованного в «Реакции низкоэнергетического ядерного синтеза» (РНЭС). Основываясь на этих результатах и многолетних исследованиях землетрясений и вулканической активности, авторы данной статьи выдвигают гипотезу о преимущественно химической природе энергии, высвобождающейся при землетрясениях и извержениях вулканов с участием первичного водорода и гелия: высокая подвижность водорода и окислителей обеспечивает фокусировку и накопление скрытой химической энергии, которая внезапно и мгновенно высвобождается в виде взрывов и инициирует землетрясения и/или извержения. В данной статье извержение вулкана рассматривается как особый тип землетрясения, при котором гипоцентр поднимается на поверхность Земли. Авторы выдвинули новую гипотезу о том, что LENR выделяют значительную энергию при землетрясениях и извержениях в процессе синтеза элементов, более лёгких, чем железо, создавая таким образом избыточную энергию, которая частично используется для синтеза более тяжёлых элементов. Сочетание химических и ядерных реакций превращает эти центры геофизической активности в гигантские реакторы, в которых происходит ядерное, химическое и термическое преобразование материалов мантии и формирование первичных залежей тяжёлых элементов, таких как уран, торий, золото и т. д. Таким образом, все химические элементы тяжелее железа не обнаруживаются в солнечном ветре. Эти элементы, обнаруженные на нашей планете, могли быть (и, вероятно, были) созданы на Земле, а не занесены из сверхновых звёзд или далёких галактик. Насколько нам известно, эта гипотеза до сих пор не выдвигалась.

Ключевые слова

Реакции ядерного синтеза с низкой энергией" (LENR), Вулканы, Землетрясения, Рудные месторождения

Делитесь и цитируйте:

Вол, А. и Гилат, А.Л. (2025) Низкоэнергетический ядерный синтез при землетрясениях, извержениях вулканов и образовании тяжелых элементов. *Международный журнал наук о Земле*, **16**, 71-98. doi: 10.4236/ijg.2025.161005.

1. Введение

В 1985 году Мартин Флейшман и Стэнли Понс наблюдали аномальное поведение экспериментальной электрохимической ячейки, которое включало плавление и частичное испарение палладиевого катода, что приводило к электролизу тяжёлой воды, содержащей дейтерий. В 1989 году была опубликована гипотеза о холодном ядерном синтезе [1]. 1989 год ознаменовал начало интенсивных исследований явлений, называемых «реакциями ядерного синтеза с низкой энергией» (LENR). К 2010 году эти исследования LENR позволили синтезировать почти все известные химические элементы, даже новый трансурановый элемент, и выдвинуть несколько гипотез о важной роли LENR в планетарных ядрах, источнике внутренней энергии Земли и планет-гигантов.

Более 20 лет назад авторы этой статьи выдвинули гипотезу о том, что энергия, высвобождающаяся во время землетрясений и извержений вулканов, в основном имеет химическую природу и образуется с участием первичного водорода и гелия [2] [3]. Экспериментально установленное и теоретически подтверждённое явление преобразования захваченной и накопленной в процессе аккреции Земли скрытой энергии первичного водорода и гелия, высвобождаемой в результате процессов дегазации из ядра Земли и нижней мантии за счёт разложения их соединений и межпоровых растворов, в совокупность различных видов тепловой, электромагнитной и химической энергии активных соединений, которые отвечают за основные процессы на Земле. Высокая подвижность водорода и окислителей (кислорода, серы и галогенов) обеспечивает сосредоточение и накопление их скрытой химической энергии, которая внезапно высвобождается в виде взрыва, вызывающего землетрясения и/или извержения. Извержение вулкана рассматривается как особый тип землетрясения, при котором гипоцентр поднимается на поверхность Земли; извержение может сопровождаться вулканическими толчками, которые представляют собой гармонические или негармонические колебания земной поверхности продолжительностью от нескольких минут до нескольких месяцев.

Примеры критического анализа были приведены ранее [2] [3]. Таким образом, парадигме объяснения землетрясений «упругим отскоком» более 100 лет; она не может обеспечить краткосрочный прогноз землетрясений (когда, где и насколько сильными они будут) и не может объяснить все накопленные факты. Например, известно, что максимальное количество упругой энергии, накопленной в любом материале, равно его критической энергии разрушения. Авторы рассчитали эту критическую энергию для блока высококачественной конструкционной стали размером $600 \times 100 \times 20$ км, что примерно соответствует размеру блока разломанной литосферной породы, в котором в 1964 году на Аляске произошло землетрясение магнитудой 8,6, или 5×10^{18} Дж. Результат для стального блока составил от 5×10^{14} до 3×10^{15} Дж [2]. Таким образом, энергия землетрясения в разрушенной породе была на несколько порядков выше, чем считается возможным для конструкционной стали. Скорости сейсмических волн были близки к скоростям звука и превышали скорости распространения механических трещин.

Даже сегодня считается, что вулканические извержения происходят из-за магматических паровых и фреатических взрывов, которые обеспечивают максимальную мощность в начале процесса. Однако при мощном извержении Тамборы в 1815 году высвободилась кинетическая энергия в 10^{20} Дж, что эквивалентно взрыву 24 миллиардов тонн тротила, и создалось давление в несколько десятков гигапаскалей, что слишком много для парового взрыва; оно достигло максимума только после 7 месяцев непрерывной активности и в конечном итоге продолжалось 15 месяцев [там же, ссылки там же]. Тепловая энергия, излучаемая кипящим лавовым озером Ньярагонго (Заир) в 1977 году, составляла 12 200 МВт (мощность, в три раза превышающая мощность реактора Чернобыльской атомной электростанции). Обычно считается, что энергия, необходимая для поддержания кипения лавовых озёр, поступает за счёт циркуляции лавы по глубоким каналам, но когда в 1977 году землетрясение опустошило кратер Ньярагонго, Тазиев не увидел там ни каналов, ни

жидкой лавы, ни даже фумарол [4] [5]. Среднее годовое количество энергии, высвобождаемой при землетрясениях, составляет примерно 10^{25} эрг (10^{18} Дж) [6]. Исходя из измерений теплового потока, собранных в 20 тысячах скважин по всему миру, тепловая энергия, исходящая из недр Земли, оценивается в 46 ± 3 ТВт, что соответствует $1,451 \cdot 10^{21}$ Дж/год [7] [8]. Хорошо известные драматические последствия этих явлений вызваны высвобождением огромного количества энергии в единицу времени и пространства. Существует три возможных способа такого быстрого высвобождения энергии: гидротермальные, химические или ядерные взрывы.

Гидротермальные взрывы способствуют гейзерной и вулканической активности [9]-[13], где плотность реализуемой энергии ограничена давлением, температурой и объемом пара, а также свойствами нагревателя [10] [14]. Наблюдаемые гидротермальные взрывы высвобождают энергию, которая значительно ниже энергии некоторых землетрясений и извержений.

Ядерные или термоядерные взрывы (мощностью от 100 до 1000 мегатонн в тротиловом эквиваленте) высвобождают энергию в диапазоне от 10^{17} до 10^{18} Дж. Однако термоядерный взрыв невозможен в недрах Земли, потому что для ядерного взрыва необходима очень высокая концентрация обогащённого ^{235}U или ^{239}Pu , которых там нет в значительных количествах. Природный уран содержит 99,3% изотопа урана ^{238}U , который является расщепляющимся, но не делящимся. Делящиеся изотопы ^{239}Pu и ^{233}U образуются в ядерных реакторах из ^{238}U и ^{232}Th . Дисперсное распределение урана и тория в литосфере и мантии можно предположить на основании данных геонейтринной спектроскопии [7] [8]. Сейсмические характеристики ядерных, термоядерных и химических взрывов во многом уникальны, что является основой международной системы мониторинга ядерных испытаний. На протяжении многих лет эта система не обнаруживала ни одного ядерного взрыва, который можно было бы спутать с природным землетрясением или, наоборот, природное землетрясение принять за ядерный взрыв (<https://www.ctbto.org/our-work/international-monitoring-system>). Система уже доказала свою эффективность, обнаружив все шесть заявленных Северной Кореей ядерных испытаний в период с 2006 по 2017 год. Кроме того, она постоянно выявляет различные явления, в том числе землетрясения, извержения вулканов, падения метеоритов и неядерные взрывы, такие как взрыв, разрушивший Бейрут в 2020 году.

Более 20 лет назад авторы этой статьи выдвинули гипотезу о том, что энергия, высвобождающаяся во время землетрясений и извержений вулканов, в основном имеет химическую природу и образуется с участием первичного водорода и гелия [2] [3]. Экспериментально установленное и теоретически подтверждённое явление преобразования захваченной и накопленной в процессе аккреции Земли скрытой энергии первичного водорода и гелия, высвобождаемой в результате процессов дегазации из ядра Земли и нижней мантии за счёт разложения их соединений и межпоровых растворов, в совокупность различных видов тепловой, электромагнитной и химической энергии активных соединений, которые отвечают за основные процессы на Земле. Высокая подвижность водорода и окислителей (кислорода, серы и галогенов) обеспечивает сосредоточение и накопление их скрытой химической энергии, которая внезапно высвобождается в виде взрыва, вызывающего землетрясения и/или извержения. Извержение вулкана рассматривается как особый тип землетрясения, при котором гипоцентр поднимается на поверхность Земли; извержение может сопровождаться вулканическими толчками, которые представляют собой гармонические или негармонические колебания земной поверхности продолжительностью от нескольких минут до нескольких месяцев.

Учитывая вышесказанное, наиболее вероятным механизмом начала землетрясения или извержения является химический взрыв, или детонация [2] [3] [15] [16], который начинается с форшоков и позволяет накапливать и быстро высвободить огромное количество энергии. Существует скрытая энергия химически активных веществ, которая реализуется при процессах дегазации и фазовых переходах, сопровождающихся термическими и электрохимическими процессами. Гальванические и тепловые токи создают геомагнитное поле [17]. Разложение твёрдых и жидких растворов, диссоциация и химические преобразования мантийных пород приводят к

образованию взрывоопасной смеси водорода и/или метана (в литосфере) с кислородом или другими окислителями.

Предложенная здесь гипотеза демонстрирует возможное влияние LENR на эндогенные процессы в гипоцентрах землетрясений и в центрах вулканических камер с максимальной плотностью высвобождения энергии. В этих центрах химические и ядерные реакции усиливают друг друга; LENR высвобождает дополнительную энергию для синтеза гелия и других химических элементов вплоть до железа. Эта новая гипотеза расширяет наше понимание физики и химии землетрясений и процессов извержения вулканов и объясняет формирование первичных вулканогенных, магматических-гидротермальных и других связанных с ними месторождений многих химических элементов, в том числе экономически значимых месторождений урана, тория, редкоземельных элементов, золота и других.

2. Химические взрывы, связанные с землетрясениями и извержениями вулканов

Вероятность взрыва определяется следующими условиями: наличие топлива (водорода или метана в недрах Земли), наличие окислителей (кислорода, серы, хлора, фтора и т. д.), смешивание топлива и окислителя для образования горючей и взрывоопасной смеси, а также наличие источника воспламенения или условий самовоспламенения [18] [19].

Наличие топлива и окислителей определяется их высокой концентрацией в космосе и в солнечном ветре, который непрерывно бомбардирует Землю [20]-[22]. Очевидно, что все химические элементы солнечного ветра (см. **таблицу 1**) участвовали в аккреции и формировании Земли, включая водород, углерод, кислород и серу. По-видимому, большая часть первичного водорода, гелия и кислорода была захвачена во время аккреции Земли [2] [3] [22]-[24] [26] [27]. Бомбардировка солнечным ветром и процессы дегазации Земли сопровождаются образованием в её туманности кластеров HHe^+n , $\text{H}_2\text{He}^+\text{n}$ и He^+n , которые, вероятно, способствовали захвату и поглощению гелия и водорода [23]-[25]. Изобилие и химическая активность водорода, кислорода и углерода привели к их захвату и поглощению атмосферой, гидросферой, литосферой и мантией Земли. Также возможно включение водорода в ядро Земли [26], что может способствовать геодинамике глубин Земли [22] [27]. Возможно также образование углеводородных соединений в термобарических условиях верхней мантии [28].

.Таблица 1 Содержание химических элементов в солнечной короне и ветре [20].

Элемент	Номер элемента	Космос, Солнечный ветер, ppm
Водород	1	739,000
Гелий	2	240,000
Кислород	8	10,400
Углерод	6	4600
Неон	10	1340
Железо	26	1090
Азот	7	960
Кремний	14	650
Магний	12	580
Сера	16	440

Существует круговорот кислорода и долгосрочный обмен кислородом и окисгенированными веществами между глубинными слоями Земли, мантией и экзосферой [29], где кислород одновременно действует как катализатор во внутренних слоях Земли [30]. Хорошо известно, что «99% молекул газа, выделяющихся во время извержения вулкана, — это водяной пар (H_2O), углекислый газ (CO_2) и диоксид серы (SO_2); все эти соединения образуются в результате экзотермических реакций. Оставшийся 1% состоит из небольшого количества сероводорода, угарного

газа, хлористого водорода, фтористого водорода, гелия и других незначительных примесей» [USGS, <https://www.usgs.gov/faqs/what-gases-are-emitted-kilauea-and-other-active-volcanoes>]. В 2014–2015 годах, в период извержения вулкана Асо в Японии, в кратере Накадаке соотношение H_2O/SO_2 в газе увеличилось с 30 до более чем 60 [31], что свидетельствует о том, что реакции водорода и кислорода являются основными источниками химической энергии, высвобождающейся в недрах Земли во время извержений и землетрясений.

Таким образом, очевидно, что водород и кислород присутствуют во всех слоях Земли. Литосфера содержит горючий водород и метан — взрывоопасное соединение водорода (см. **таблицу 2**). Извержения вулканов часто представляют собой поток природных взрывов (внезапное, быстрое высвобождение энергии, которое создаёт потенциально опасное давление), пожаров или дефлаграций (скорость пламени ниже скорости звука, которая при атмосферном давлении примерно равна 335 м/с) и детонаций (взрыв, при котором скорость пламени превышает скорость звука) [33] [34]. Взрыв или детонация возможны при наличии 1) реакционноспособного состава газообразных смесей, 2) критической энергии инициирования, 3) критического радиуса пор или газового пузыря, который соответствует ударной волне, создаваемой инициатором, и детонации Чепмена-Жуге (CJ). Все эти условия, по сути, основаны на модели детонационных волн Зельдовича-фон Неймана-Дёринга (ZND) [33]-[35].

.Таблица 2 Свойства водорода и метана [19].

Имя	Измерение	Водород	Метан
Молекулярная масса	г / моль	2.016	16.043
Температура кипения	К	20	111
Плотность жидкости	г /мл	71	422
Пределы воспламеняемости в воздухе	Объем %	4 - 75	5.3 - 17
Пределы взрываемости в воздухе	Объем %	18.3 - 59	6.3 - 13.5
Минимальное давление самовозгорания	Бар	~41	~100
Минимальная энергия воспламенения	J	0.02	0.29
Температура пламени в воздухе	К	2318	2148
Температура самовоспламенения	К	858	813

Обратите внимание, что метан является легковоспламеняющимся и взрывоопасным компонентом шахтного газа [32].

Землетрясение — это подземный взрыв, интенсивность которого зависит от глубины (от нескольких километров или десятых долей километра до сотен километров) гипоцентра (центра взрыва) и количества взорвавшейся взрывчатки. Можно услышать отдалённый «грохот» и, возможно, почувствовать слабое сотрясение. Следующий форшок (или основной толчок) произойдёт на меньшей глубине. Моряки сравнивают его со звуком отдалённой артиллерийской канонады. Если эпицентр находится близко, вы почувствуете горячий ветер и воздушную волну и увидите, как растёт облако пыли, закрывающее обзор на место катастрофы: разрушенные и падающие здания, образование разрывов и закрытие этих разломов; много раненых и погребённых заживо людей. Подобно взрыву в приповерхностном землетрясении, взрыв в жерле вулкана похож на взрыв при извержении. Химические взрывы являются спусковым механизмом, первым этапом землетрясений и извержений [2] [3] [15] [16]. Химические взрывы высвобождают энергию, которую: а) можно легко сфокусировать; б) она обладает очень высокой плотностью; в) обеспечивает очень высокую скорость высвобождения энергии; г) может транспортироваться с высокой плотностью и относительно небольшими потерями на большие расстояния. Такие химические источники энергии в мантии могут практически постоянно высвобождать энергию и практически не иметь ограничений [2].

Повышение температуры увеличивает диапазон взрывоопасной смеси с (4–75)% до (1–90)% мольных долей водорода при 25°C и 400°C соответственно [36]. Для образования реактивной газовой смеси (i) требуется подвижность топлива и

окислителя, которая увеличивается с повышением температуры и снижается с повышением давления [37]. Концентрация и подвижность водорода зависят от давления, температуры и присутствия гелия и других благородных газов [38]-[42]. Водород, вода и благородные газы изменяют проводимость пород мантии, диффузионную проницаемость, вязкость и границы раздела фаз [41] [43]-[49]. Многие экспериментальные и теоретические работы были посвящены изучению возможных фазовых превращений материалов мантии с глубиной.

К сожалению, эти работы в основном посвящены равновесным процессам, а статические фазовые диаграммы не учитывают принципиально динамическую природу всех явлений. Помимо прочих процессов, солнечные и лунные приливы создают в мантии волны расширения давления; их скорость линейно уменьшается с увеличением глубины: от более чем 460 м/с на экваториальной поверхности до 405 м/с на глубине 800 км. Необходимым условием для взрывов, вызывающих землетрясения и извержения, является создание детонационных камер и накопление в них взрывоопасных газовых смесей. Динамическое охрупчивание, приводящее к образованию микротрещин и трещин при прохождении приливных волн, вероятно, является основным механизмом этого процесса. Явление динамического охрупчивания хорошо известно [50]-[54]. Это немонотонная функция температуры, зависящая от давления и скорости нагружения, которая сопровождается адсорбцией/десорбцией водорода и других веществ на границах зёрен. Динамическое охрупчивание мантийных пород, обогащённых водородом, кислородом и благородными газами, требует дальнейшего изучения. Считается, что приливные волны вызывают землетрясения и извержения [55] [56]. Изменения давления, температуры, состава и структуры мантийных материалов с глубиной приводят к изменениям физико-механических свойств, которые отражаются на скорости сейсмических волн, как показано на **рисунке 1**.

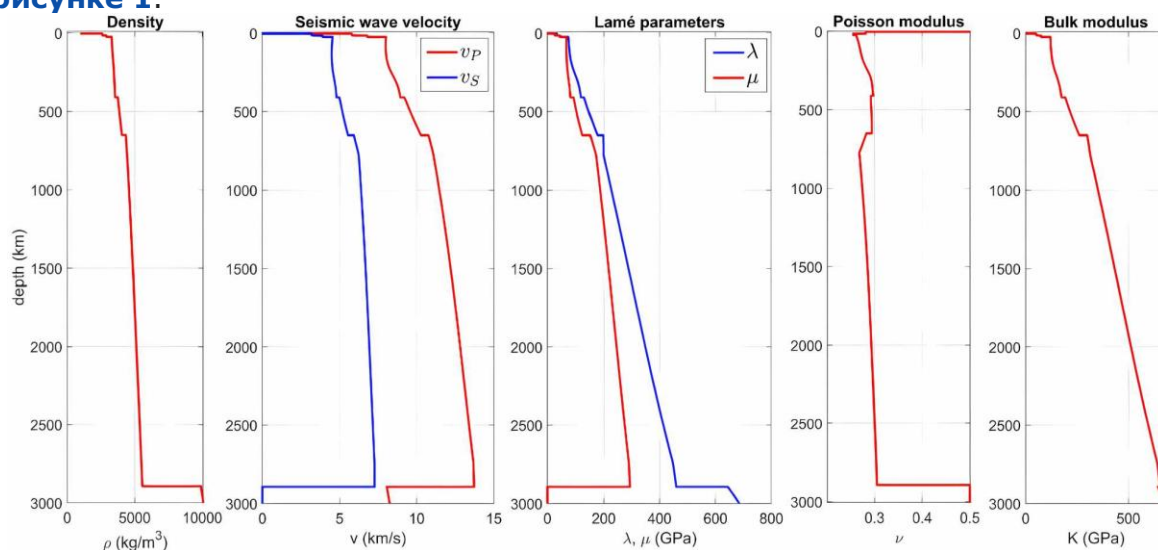


Рис.1 Средние физические свойства, полученные на основе скорости сейсмических волн в зависимости от глубины в земной коре и мантии. Данные о скорости сейсмических волн из (Б. Кустовски, Г. Экстрём, А. Дзевоньски, Анизотропная структура скорости поперечных волн в мантии Земли: глобальная модель. J. Geophys. Res. Твердая Земля 113, 6 (2008)), эталонная модель STW105 (2008) [57].

Уменьшение скорости приливных волн и изменение физико-химических свойств мантийных пород с глубиной определяют максимально возможную глубину гипоцентров землетрясений, которая соответствует всем известным наблюдениям [58]. Над переходной зоной мантии повышение давления и температуры с глубиной расширяет границы взрывоопасного газового состава, тем самым увеличивая вероятность взрыва (землетрясения, извержения) [36]. Уникальная роль водорода и гелия в формировании планет и их динамике была описана [2] [3] [15] [22]-[25] [27] [59] [60]. Недавно была обнаружена дисперсия

гидрида гелия в космосе и планетарных туманностях. Переходная зона отличается высоким содержанием воды [61]. Содержание воды увеличивается в переходной зоне мантии [61]. Гелий и другие благородные газы улучшают подвижность водорода и кислорода [47] [48] [62]-[64]. Эти газы и вода действуют как рабочее тело, повышающее эффективность и мощность взрывов [65] [66]. Несмешиваемость водорода с водой в верхней мантии при давлении более 2 ГПа приводит к локальному появлению несмешивающихся жидкостей, богатых водородом, которые могут быть причиной образования взрывоопасных смесей [64] [67]. Наличие воды в мантии обеспечивает физико-химические и электрохимические процессы, в том числе образование водной магмы [68], и, скорее всего, приводит к водородно-кислородному циклу на Земле [29] [30] [69] [70]. Обратите внимание, что самовоспламенение наблюдалось при комнатной температуре в микропузырьках водородно-кислородных смесей размером от 5 до 20 микрон при атмосферном давлении в воде — чрезвычайно эффективном охладителе [71] [72]. Эти размеры меньше, чем типичные размеры зёрен и пор в горных породах [73] [74]. Таким образом, взрывы пористых горных пород, содержащих газообразные смеси водорода и кислорода, а также метана и кислорода, являются наиболее вероятными причинами землетрясений из-за повсеместного присутствия водорода, метана и кислорода в недрах Земли [28] [75] [76].

Ниже представлены несколько кратких выводов из этой части:

- Состав и условия в верхней части мантии и литосфере обеспечивают химические цепные реакции, которые вызывают взрывы, являющиеся, по крайней мере, причиной, а также важным источником энергии землетрясений. Водород и метан, скорее всего, являются основными горючими веществами (или реагентами) при этих взрывах или детонациях; кислород и сера являются основными окислителями.
- Гелий играет важную роль в транспортировке и распределении водорода посредством образования и распада гелий-водородных соединений;
- Гелий и аргон повышают деформируемость и эластичность силикатных пород, ускоряют диффузию и улучшают преобразование химической энергии в сейсмическую (механическую) энергию, выступая в качестве рабочего тела — газа, который расширяется при нагревании и сжимается на фронте ударных/взрывных волн, расширяясь после их прохождения.
- Минимальный радиус пор или трещин в гипоцентрах землетрясений может быть связан с повышением температуры и давления с глубиной, что увеличивает критическую скорость хрупких трещин и сейсмических волн. По мере увеличения радиуса гипоцентров увеличивается и линейная скорость приливных волн. Совместное действие этих факторов приводит к возможности образования микротрещин и пор, необходимых для создания детонационных камер с взрывоопасными газовыми смесями на глубине менее 700–750 км (см. данные на [рисунке 2](#)).

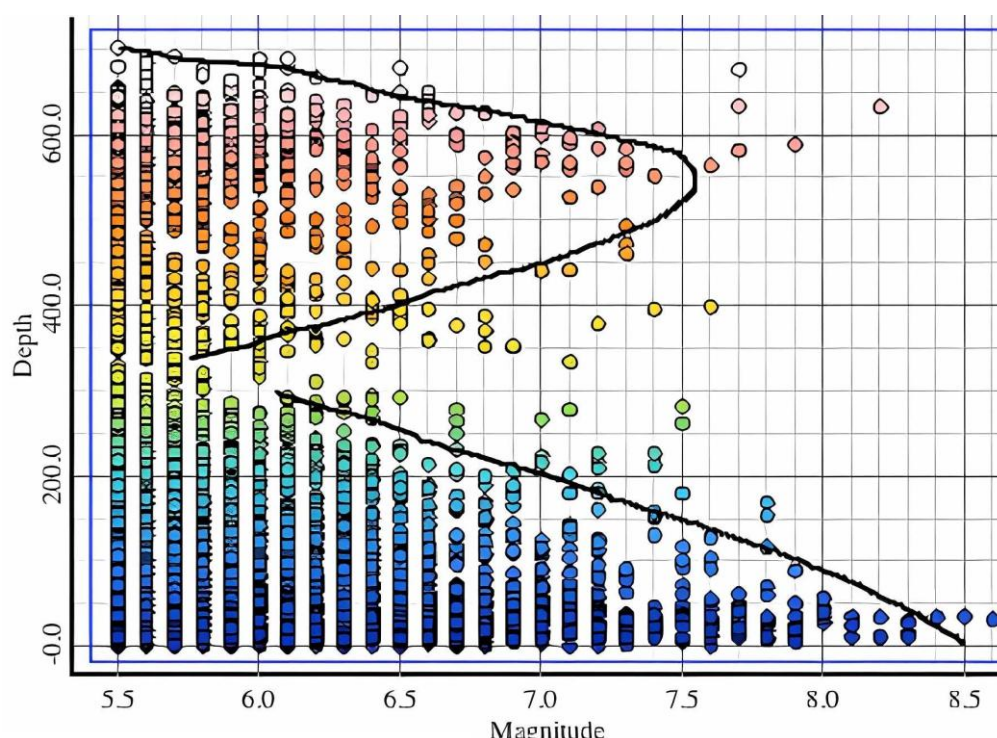


Рис. 2 Распределение землетрясений по магнитуде и глубине.

([http://app.earth-](http://app.earth-observer.org/data/basemaps/images/global/Earthquakes_512/EarthquakesGt5Depths_512/EarthquakesGt5Depths_512.html)

[observer.org/data/basemaps/images/global/Earthquakes_512/EarthquakesGt5Depths_512/EarthquakesGt5Depths_512.html](http://app.earth-observer.org/data/basemaps/images/global/Earthquakes_512/EarthquakesGt5Depths_512/EarthquakesGt5Depths_512.html)).

3. Необходимость LENR на Земле для поддержания внутреннего энергетического баланса

Исходя из данных о тепловом потоке, собранных в двадцати тысячах скважин по всему миру, тепло, исходящее из недр Земли, оценивается в 46 ± 3 тераватта. Внутренний энергетический баланс Земли включает как нерадиогенные, так и радиогенные компоненты (**Таблица 3**).

Таблица 3 Нерадиогенные компоненты энергетического бюджета Земли [77].

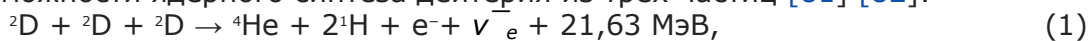
Название Процесс	Энергия, ТВт
Дифференциация мантии	0.6
Тепловое сжатие	2.1
Гравитационная энергия, вызванная землетрясением	2
Излучаемая сейсмическая энергия	0.3
Приливное трение	1 - 2

Существует два типа радиогенных источников энергии: распад радиоактивных изотопов и низкоэнергетические реакции ядерного синтеза (LENR) элементов, которые легче железа ($z = 26$).

Спектроскопия геонейтрино позволила оценить следующее влияние распада: ^{238}U — 8 ТВт, ^{235}U — 0,3 ТВт, ^{232}Th — 8 ТВт и ^{40}K — 4 ТВт [8]. Таким образом, общий тепловой поток от ядерного распада и нерадиогенных источников составляет $20 \pm 0,5$ ТВт.

Есть причина рассматривать LENR как дополнительный источник внутренней энергии Земли на протяжении миллиардов лет выработки тепла, создания и поддержания геомагнитного поля и движения литосферных плит [78]-[83]. Открытие и исследование низкоэнергетических реакций ядерного синтеза (LENR) [1] [84]-[87] привели к выдвижению гипотез, касающихся LENR как основных источников внутренней энергии Земли и других планет. Возможное возникновение LENR в ядре

Земли и на газообразных планетах-гигантах может быть результатом условий (высокого давления и температуры), которые приводят к вырождению электронов и возможности ядерного синтеза дейтерия из трёх частиц [81] [82]:



где: $\bar{\nu}_e$ электронное антинейтрино.

Магму можно описать как тёплую плотную материю (WDM) [83]. Тёплая плотная материя — это экзотическое состояние, характеризующееся такой высокой плотностью и температурой, что кулоновские корреляции, тепловые возбуждения и фермионные обменные эффекты одинаково значительны [88]. Состояние WDM магмы может быть результатом термогидроударов, приводящих к взрывам и схлопыванию газовых пузырьков [89]-[92]. Эти термогидроудары создают условия для LENR на основе мюон-катализируемого синтеза (μCF) [83] [93].

4. Центры геодинамики наиболее благоприятны для LENR

Результаты теоретических и экспериментальных исследований низкоэнергетических ядерных реакций в твёрдых телах и расплавах [94]-[102] позволили исследователям выдвинуть несколько гипотез, несмотря на то, что для низкоэнергетических ядерных реакций не существует удовлетворительной физической теории.

Группа Токийского университета изучала протоны и тритоны из реакции $d(d, p)t$ в жидких In, Sn, Pb и Bi во время бомбардировки пучком молекулярного дейтерия $D + Z$ с энергией $15 < E < 60$ кэВ и реакции $D(d, p)T$ в различных твердых металлах при энергиях бомбардировки от 2,5 до 25 кэВ; они также изучали $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$ реакцию в Pd и Au при энергиях бомбардировки от 30 до 75 кэВ. Целью этих исследований было экспериментальное измерение энергии экранирования и её влияния на скорость LENR [96]-[98].

Эксперименты LENR также продемонстрировали ряд ядерных реакций, которые приводят к образованию или преобразованию элементов. Например, эксперименты LENR с дейтерием в металлах позволили обнаружить: Sc, Ti, V, Ag, Cd, In, P, Cl, Br, Ge, As, Kr, Sr, Y, Ru, Xe, которые были обнаружены в палладии. Более того, особый тип электрического разряда между электродами привёл к появлению и накоплению в воде ряда химических элементов, от Li до Pb, включая дейтерий и тритий [101].

Многоядерная природа и гипотеза «совместного процесса столкновения» косвенно подтверждаются результатами исследования каталитического действия нейтрино и антинейтрино [101].

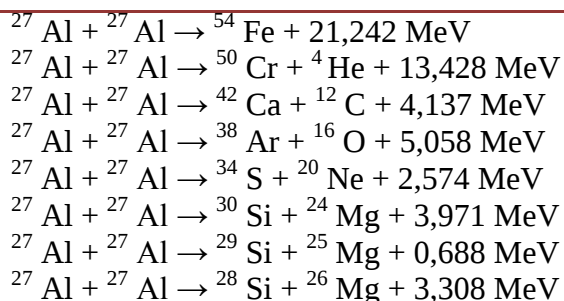
Наблюдаемая скорость LENR не может быть объяснена только экранированием проводящими электронами, и необходимо учитывать окружающую ядра среду. Таким образом, авторы выдвинули гипотезу о многоядерной бомбардировке в процессе «кооперативного столкновения» [96]-[98].

Кооперативный характер процессов, требующих ядерного синтеза (LENR), подтверждается [86] [87] [99] [103] [104] (см. **таблицу 4**). На это предположение косвенно повлияла каталитическая активность низкоэнергетических нейтрино в LENR [101]. «В отличие от многих других гипотез, гипотеза о том, что низкоэнергетические нейтрино участвуют в ядерных преобразованиях, позволяет объяснить многие особенности LENR:

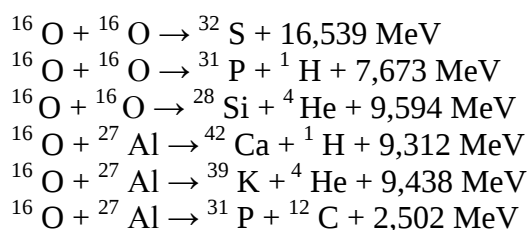
- Появление большого количества разнообразных нуклидов не только в «топливе», но и в окружающей среде;

- Необходимость нагревать или иным образом обеспечивать энергией частицы вещества;
- Потребность в достаточно плотной среде;
- Отсутствие (или очень низкая интенсивность) жесткого ядерного излучения;
- Важно отметить, что при ядерных превращениях с участием нейтрино “проблемы кулоновского барьера” не существует”. [101].

Таблица 4 Возможные ядерные реакции в корунде (Al_2O_3) [101].



Дополнительные нуклиды могут образовываться в результате взаимодействия двух ядер кислорода и ядер кислорода и алюминия:



Известные результаты исследований LENR в твёрдых расплавах и электролитах указывают на возможность синтеза всех элементов в условиях мантии, в то время как в ядре, содержащем в основном железо и никель, единственным возможным источником ядерной энергии являются изотопы водорода (см. выше).

Синтез тяжёлых и сверхтяжёлых элементов в лабораторных условиях является ярким примером LENR, который принципиально отличается от взрыва сверхновой (рис.3). Согласно существующим теориям, уран и другие тяжёлые элементы имеют преимущественно космическое происхождение, о чём свидетельствуют исследования состава метеоритов и микрометеоритов солнечного ветра [106]-[109], и это отражено в периодической таблице НАСА. Взрывы сверхновых сопровождаются синтезом тяжёлых элементов и обогащением этими элементами метеоритов и космической пыли. Различные условия в звёздах способствуют синтезу разных элементов, которые попадают в атмосферу, гидросферу и литосферу в результате бомбардировки метеоритами и тяжёлыми частицами [110]. Современные исследователи предполагают, что химические элементы образуются в результате нуклеосинтеза в космосе и в процессе эволюции звёзд, как показано на риске 4.

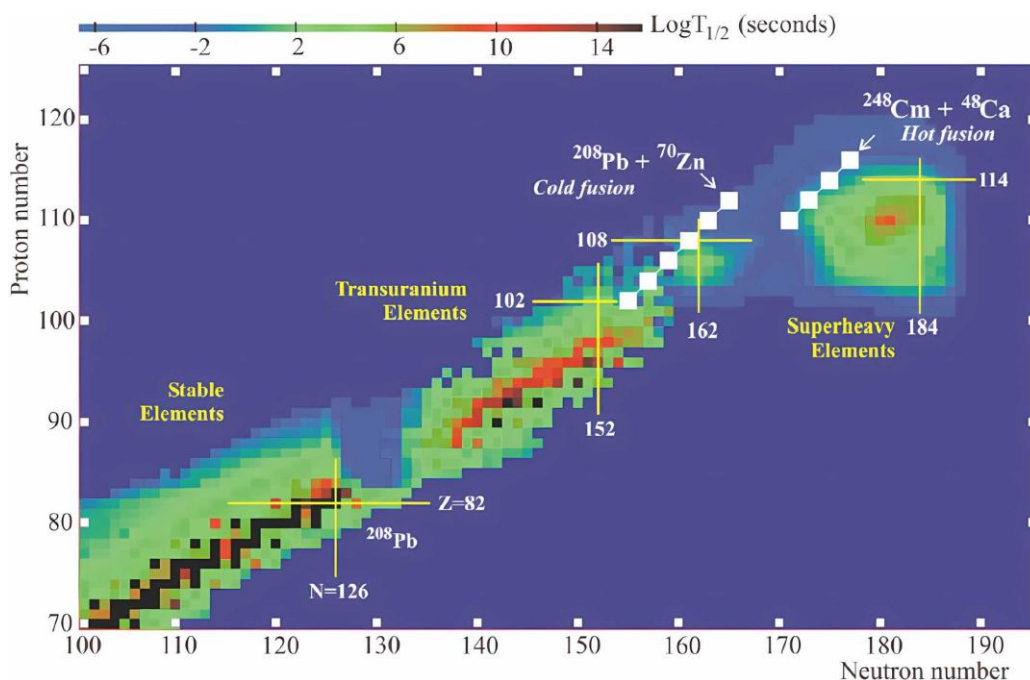


Рис.3. Диаграмма нуклидов, области тяжелых и сверхтяжелых элементов [105]. Белыми квадратами показаны цепочки последовательного α -распада ядер элемента 112, образующихся в реакции холодного синтеза $^{208}\text{Pb} + ^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{277}\text{112} + n$, и элемента 116, образующегося в реакции горячего синтеза $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{293}\text{116} + 3n$. Восемь дополнительных нейтронов увеличили бы период полураспада $^{277}\text{112}$ на четыре или пять порядков [105].

Постоянная скорость распада изотопов составляет основу радиометрической шкалы, используемой в геологии для оценки возраста горных пород и отложений. Известное уравнение для датирования горных пород выглядит следующим образом:

$$t = \lambda^{-1} \ln(1 + D/P) \quad (1)$$

где: t - возраст образца породы или минерала;

D - количество атомов дочернего продукта на сегодняшний день;

P - количество атомов исходного изотопа на сегодняшний день;

λ — соответствующая константа распада, которая для каждого родительского изотопа связана с его периодом полураспада: $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

Константа распада для U-238 равна $1,45 \cdot 10^{-10}$ лет $^{-1}$.

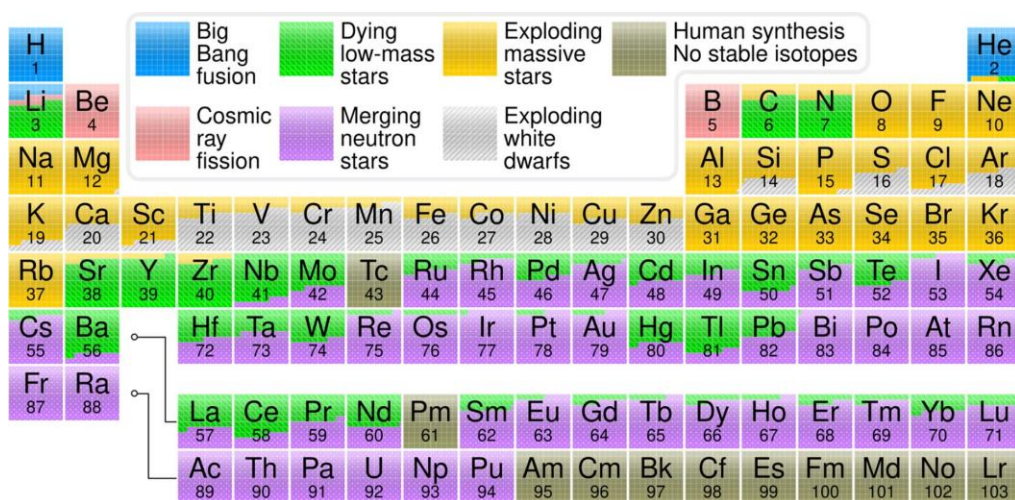


Рис.4. Периодическая таблица, показывающая происхождение элементов в Солнечной системе, на основе данных Дженнифер Джонсон из Университета штата Огайо. Процентное соотношение происхождения каждого элемента представлено в

виде квадратов (из ста), чтобы было проще оценить пропорции; при наведении курсора на изображение SVG отображаются точные цифры в виде подсказок. Элементы, расположенные выше лоуренсия, не включены. В объяснении Джонсона есть предостережение: «Мы до сих пор не знаем всего...». Изображение — «Астрономическая картинка дня» НАСА от 09.08.2020, 24.10.2017 и 08.01.2023 (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleosynthesis_periodic_table.svg).

Для точного определения возраста горных пород и месторождений необходимо учитывать влияние химической поляризации [138] на кинетику ядерных процессов, используя комбинацию различных изотопов и методов.

Радиометрические шкалы также используют изотопные соотношения между различными изотопами со средним и коротким периодом полураспада, а также химический и активационный анализ различных дочерних продуктов, как показано в **таблице 5**. Эта технология позволила нам оценить возраст метеоритов [112]-[119]. Более того, такой анализ выявляет и доказывает наличие нуклеосинтеза в метеоритах и астероидах [120]-[122].

Таблица 5. Различные изотопы, используемые для геофизического датирования [110] [111].

Исходный изотоп	Стабильный дочерний Продукт	Принятые в настоящее время значения периода полураспада
Уран-238	Свинец-206	4,5 миллиарда лет
Уран-235	Свинец-207	704 миллиона лет
Торий-232	Свинец-208	14,0 миллиарда лет
Рубидий-87	Стронций-87	48,8 миллиарда лет
Калий -40	Аргон-40	1,25 миллиарда лет
Самарий-147	Неодим-143	106 миллиардов лет

5. Возможность планетарного происхождения тяжелых элементов

Радиометрическое датирование указывает на «молодой» возраст большинства месторождений урана и редкоземельных металлов, а также метеоритов [123] [124].

Возраст гнейсовой формации в Карельском регионе на востоке Финляндии составляет 2,7 млрд лет [125], возраст старого гранитного Трансвааля в Южной Африке — 3,2 млрд лет, а возраст гнейсов Мортонна на юго-западе Миннесоты — 3,6 млрд лет [126]. Радиометрическое датирование основано на анализе концентраций короткоживущих и долгоживущих изотопов и продуктов их распада. Например, четыре изотопные системы (Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Re-Os), применённые к включениям Fe-сульфидов и CaSiO₃ в 13 сублитосферных алмазах из Жуины (Бразилия) и Канкана (Гвинея), дают широкий диапазон возрастов кристаллизации от 450 до 650 миллионов лет назад [127]. «Южно-Файзулинское марганцевое месторождение формировалось в течение следующих четырех последовательных этапов: 1) Седиментация и диагенез рудоносных отложений в среднедевонский период (395 - 349 миллионов лет назад), 2) Метагенез марганецсодержащих пород в среднедевонский-раннекаменноугольный период, 3) Гидротермально-метасоматическая рудная минерализация в ходе тектонической деформации вулканогенно-осадочных пород в среднекаменноугольный-пермский период (около 300 миллионов лет назад), и 4) Гипергенные изменения и частичное денудация месторождения в мезозойско-четвертичный период (около 250-66 миллионов лет назад)” [128].

Химический и изотопный анализ образцов горных пород из урановых месторождений не соответствует их внеземному происхождению.

Планетарный экзотермический низкоэнергетический ядерный синтез относительно лёгких элементов ($Z \leq 26$) может происходить как в твёрдой, так и в жидкой

(расплаве) фазе и не требует высокой температуры, необходимой для синтеза в газовой плазме [86] [87] (оба из НАСА), как показано во всех исследованиях LENR. Эти экзотермические процессы могут быть катализированы солнечными нейтрино и геонейтрино, электрическими разрядами (пьезоэлектрическими, трибоэлектрическими и термогальваническими токами) и излучением, как описано выше. Процессы LENR могли преобладать в условиях высоких температур в течение первого миллиарда лет истории Земли; самые древние из когда-либо найденных горных пород (возрастом 3,9–3,5 миллиарда лет) относятся к архейской эпохе, и их состав похож на состав горных пород в основании континентального ядра. Все эти породы в конце этой эпохи и в начале протерозойской эры (от 2500 до 538,8 млн лет назад) подверглись интенсивной деформации, метаморфизму, гранитным интрузиям, горообразованию и обогатились железом и тяжёлыми элементами. Позднее эндотермический синтез тяжёлых элементов при избыточной плотности высвобождаемой энергии, создаваемой импульсными процессами с высокой концентрацией энергии, стал (и является) возможным. Максимальная вероятность возникновения таких явлений существует в гипоцентрах землетрясений, вулканических камерах, мантийных плюмах и на границах фаз.

Предложенная в данной работе гипотеза заключается в том, что баланс радиогенных компонентов внутренней энергии Земли должен включать экзотермические реакции распада и синтеза лёгких элементов ($Z \leq 26$), а также эндотермический синтез тяжёлых элементов, в том числе редкоземельных, благородных металлов, урана и тория. Богатый химический состав мантии, в отличие от твёрдого ядра, создаёт условия для ядерных реакций: синтеза или преобразования различных элементов — их стабильных и/или нестабильных изотопов. «Молодой» возраст радиоактивных изотопов, космическое расстояние между Землей и Сверхновой и распределение отложений тяжелых элементов являются естественной основой для предложенной гипотезы. Сочетание радиометрической шкалы с петрографическим и геохимическим анализом необходимо для точного определения времени. Геонейтринный спектроскоп позволяет оценить распределение урана, тория и калия между ядром-мантией и литосферой, и наблюдаемое распределение косвенно подтверждает нашу гипотезу. Уран-свинцовая краеугольная хронология метеоритов и земных пород позволяет косвенно оценить влияние взрыва сверхновой на содержание урана в Солнечной системе. Возраст самых древних метеоритов близок к возрасту Земли, и соотношение уран-свинец в них будет значительно меньше, чем в земных породах, особенно с учётом того, что эти элементы сохраняются в метеоритах на протяжении всего их существования. Небольшое соотношение (см. [таблицу 6](#)) отражает молодой возраст метеоритов и снижает вероятность низкоэнергетического ядерного синтеза в метеоритных породах. В любом случае, этот уран не является продуктом взрыва сверхновой или других звёздных систем.

Таблица 6. Распространённость [109] и расчётный (по уравнению (1)) возраст элементов.

Источник	Уран, промилле	Свинец (Pb), ppm	Соотно- шение U/Pb	Расчетный возраст, млн лет
Метеориты	0.008	2.470	0.003	19.45
Примитивная мантия	0.021	0.185	0.113	695.2
Континентальная кора	1.400	12.600	0.111	683.5

Таким образом, мы предполагаем, что первичные и вторичные месторождения урана и тория встречаются в виде скоплений в геологически благоприятных зонах, в основном вблизи крупных глубинных разломов, особенно в гипоцентрах землетрясений и камерах вулканических извержений, локализованных в разных частях палеовулканов (Геология и геохимия месторождений урана и тория, 2015). Это верно для урана, тория и редкоземельных элементов (РЗЭ) (см. [рисунок 5](#)), а также для Mo, W, Cu, Ag, Au, Zn, Pb, Sn, Hg, As и S, залежи которых были обнаружены в

вулканогенных структурах [129]-[137]. Вулканогенные системы являются центрами плутонической активности, для которых характерна повышенная структурная и физико-химическая открытость, сопряженная во времени с рудообразующими процессами. Эти факторы способствуют образованию различных типов рудных месторождений: эксгальационных, вулканогенно-гидротермальных и вулканогенно-осадочных, поскольку они связаны с разнообразными и богатыми рудными комплексами. Физико-химические процессы, вызывающие землетрясения и извержения вулканов [2] [3] [15] также создают благоприятные условия для увеличения скорости синтеза LENR относительно лёгких элементов (с порядковым номером менее 26 Fe) и обеспечивают большое количество энергии для синтеза тяжёлых элементов, U-Th-PЗЭ и, возможно, трансурановых элементов.

Начальным этапом землетрясения является химический взрыв, ударные волны которого создают пьезоэлектричество высокого напряжения в силикатных породах и сопровождаются химической поляризацией ядер и электронов, что создаёт внутриядерный резонанс и «процесс совместного столкновения» (многоядерные колебания), которые могут увеличить скорость LENR на 10–20 порядков [96]-[98] [100] [101]. Ударные волны способствуют сближению, что может увеличить скорость LENR на 80 порядков [100]. Электрический разряд химических взрывов и прорывы потока газа-магмы через трещиноватые и пористые породы создают волны сжатия-разрежения и кавитацию [90]; согласно гипотезе, предложенной в 2020 году [83], это может привести к образованию мюонов и мюонному катализу низкоэнергетических реакций синтеза. Создание локального перегрева растворов и расплавов приводит к появлению гальванических и термоэлектрических электрических разрядов, которые способны вызывать гидрирование и ядерный синтез (LENR) в твёрдой и жидкой фазах.

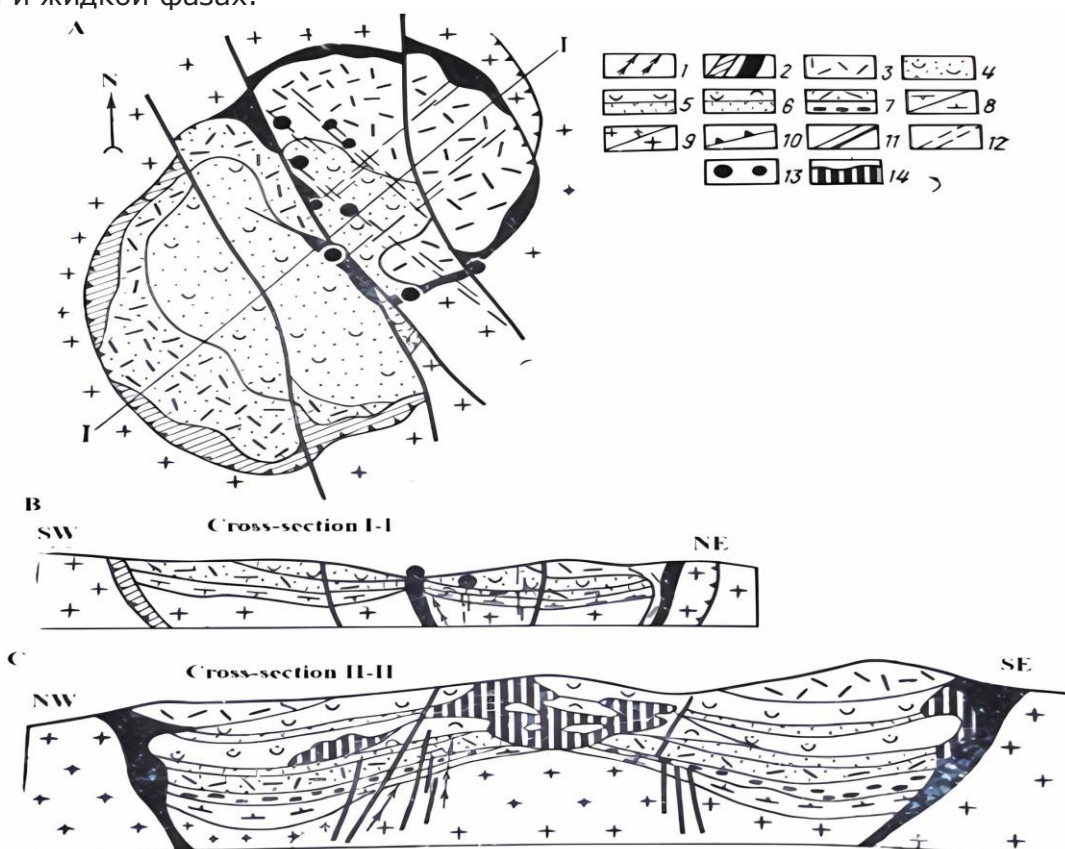


Рисунок 5. Геологическое положение и особенности строения рудоносных полей вулканической кальдеры ([129], рис. 50, перевод с русского А. Гилата); (А) Схематическая геологическая карта рудных месторождений кальдеры; (В) Геологические разрезы I-I; (С) Геологические разрезы II-II. Условные обозначения: 1. Самые молодые дайки кислого и щелочного состава; 2. Поздние субвулканические риолитовые интрузии; 3. Преимущественно обожженный туф, игнимбрит и брекчии

верхней риолитовой группы; 4. Неразделенные вулканогенно-осадочные породы Средней толщи; 5. Обоженный риолитовый туф, туфобрекчии и туфопесчаник верхней толщи; 6. Различные туфы-риолиты, туфиты, брекчии и туфопесчаники Средней толщи. толща; 7. Игнимбрит и обоженный риолитовый туф, песчаник и конгломерат толщи Ловер; 8. Дацит, андезит, туфо-андезитовый и андезитобазальтовый туф нижней толщи; 9. Варисканские и каледонские гранититы и реликты их кровли, кристаллические сланцы и гнейсы; 10-11: Разломы; 10. Кольцевидные и дугообразные; 11. Линейная прорезь; 12. Слепые зоны разломов фундамента; 13. Экономические месторождения урана и рудопроявления; 14. Выступы урановой руды на поперечных сечениях.

Тепловые и акустические колебания, гальванические токи и пьезоэлектричество, а также образование ударных и взрывных волн в гипоцентрах землетрясений и магматических камерах вулканов [2] [3] [15] создают наиболее благоприятные условия для LENR. Химическая поляризация, вероятно, также способствует дополнительному ускорению LENR [138]. Суммарное высвобождение химической и ядерной энергии при синтезе легких элементов создает условия для синтеза тяжелых элементов, включая редкие металлы и уран, и трансуранового синтеза, который соответствует принципу Ле Шателье и позволяет поглощать часть избыточной энергии. Повышенное соотношение He^3/He^4 и повышенная концентрация трития в вулканах [139]-[142] подтверждают активность ядерных реакций. Исходя из известных данных, можно с уверенностью предположить, что природные изотопы и радиоактивные загрязнители катализируют LENR, о чём косвенно свидетельствует повышенная концентрация трития в местах ядерных испытаний [143]-[146]. Таким образом, мы выдвигаем гипотезу о максимальном ускорении LENR в гипоцентрах землетрясений и камерах извержения, что увеличивает энергию этих явлений, а также о возможности ограничения суммарного высвобождения энергии за счёт низкоэнергетического синтеза элементов ($Z \leq 26$ Fe). Обратите внимание, что (а) LENR элементов ($Z \geq 26$ Fe) являются наиболее эффективным способом поглощения энергии в условиях сверхвысоких температур при детонации, и (б) эта гипотеза объясняет происхождение распространённых первичных месторождений урановых и ториевых руд РЗЭ.

До сих пор не были предложены теория участия LENR в землетрясениях и извержениях вулканов и удовлетворительная гипотеза образования урановых руд.

Предложенные здесь гипотезы основаны на универсальных физико-химических законах, например, на принципе Ла Шателье, который (если не доказано обратное) должен работать в любых условиях, в том числе при сверхвысоких температурах и давлениях, преобладавших во время аккреции Земли, а также на геологических наблюдениях. Гипотезы подтверждаются результатами недавних экспериментов при сверхвысоких температурах и давлениях, которые можно воспроизвести в любой подходящей лаборатории, в том числе в лаборатории природы.

Огромное время, которое потребовалось для переноса тяжёлых элементов от сверхновых к Земле, и тесная связь между вулканами и ураново-ториевыми месторождениями косвенно подтверждают предложенную гипотезу. Следуя принципу бритвы Оккама, мы утверждаем, что химические элементы возникли на нашей планете, а не были завезены с далёких звёзд.

Отсутствие урана и тория в ядре Земли и «молодой» возраст урана в метеоритах и мантии делают теорию о внеземном происхождении урана, тория и редкоземельных элементов весьма сомнительной. Более того, возраст многих месторождений урана составляет менее одного миллиарда лет (1 млрд лет), в то время как возраст самых древних пород, определённый тем же изотопным методом, от 2 до 3,6 млрд лет, сопоставим с возрастом самой Земли. Этот факт косвенно подтверждает нашу гипотезу о том, что эти тяжёлые элементы образовались в результате низкоэнергетических ядерных реакций в верхней мантии Земли и даже в её ядре. Насколько нам известно, теория участия низкоэнергетических ядерных реакций в землетрясениях и извержениях вулканов, а также удовлетворительная гипотеза о том, что уран и другие

тяжёлые элементы образовались внутри Земли (**рисунок 4**), до сих пор не были выдвинуты.

6. Выводы

Основываясь на опубликованных результатах многочисленных экспериментов с LENR, Терез [78] [79] и Фукухара [81] [82] пришли к выводу, что LENR является единственным очевидным источником энергии, позволяющим компенсировать разницу между наблюдаемым тепловым потоком с Земли и суммарной мощностью известных нерадиогенных процессов и энергией распада радиоактивных изотопов. Авторы этой статьи, основываясь на многолетних исследованиях землетрясений и вулканической активности [2] [3], выдвинули новую нетрадиционную гипотезу об ускоренном LENR в гипоцентрах землетрясений и вулканических камерах из-за особых условий в центрах геофизической активности. В этих центрах химические реакции также вызывают химическую поляризацию электронов и ядер, что приводит к взрывам, повышению давления и температуры, ударным волнам, фазовым переходам, трибопьезоэлектричеству и гальваническому электричеству. LENR вносят значительный вклад в эти явления за счёт синтеза элементов, которые легче железа. Более того, авторы предполагают, что часть высвобождающейся энергии, поскольку в мантийных материалах присутствуют практически все химические элементы, создаёт условия, благоприятные для синтеза LENR-элементов тяжелее железа, что приводит к образованию первичных месторождений урана, тория, редкоземельных элементов, благородных металлов, которые не обнаруживаются в солнечном ветре.

Огромное время, которое требуется для переноса тяжёлых элементов от сверхновых к Земле, и тесная связь между вулканами и ураново-ториевыми месторождениями (**рисунок 5**) косвенно подтверждают предложенную гипотезу. Следуя принципу бритвы Оккама, мы утверждаем, что химические элементы возникли на нашей планете, а не были занесены с далёких звёзд.

Отсутствие урана и тория в ядре Земли и «молодой» возраст урана в метеоритах и мантии делают теорию внеземного происхождения урана, тория и редкоземельных элементов весьма сомнительной. Более того, возраст многих месторождений урана составляет менее одного миллиарда лет (1 млрд лет). В то же время возраст самых древних пород, определённый тем же изотопным методом, от 2 до 3,6 млрд лет, сопоставим с возрастом самой Земли (4,6 млрд лет). Этот факт косвенно подтверждает нашу гипотезу о том, что эти тяжёлые элементы образовались в результате LENR в верхней мантии и ядре Земли.

Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с публикацией данной статьи.

Ссылки

- [1] Флейшман М. и Понс С. (1989) Электрохимически индуцированный ядерный синтез дейтерия. *Журнал электроаналитической химии и межфазной электрохимии*, 261, 301-308. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(89\)80006-3](https://doi.org/10.1016/0022-0728(89)80006-3)
- [2] Гилат, А. и Вол, А. (2005) Первичная водородно-гелиевая дегазация, недооцененный основной источник энергии для внутренних земных процессов. *НАИТ Журнал по науке и инженерии В*, 2, 125-167.
- [3] Гилат, А.Л. и Вол, А. (2012) Дегазация первичного водорода и гелия как основной источник энергии для внутренних процессов на Земле. *Геология Границы*, 3, 911-921. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>
- [4] Тазиев, Х. (1977) Исключительное извержение: гора Нирагонго, 10 января 1977 г. *Бюллетень Вулканологии*, 40, 189-200. <https://doi.org/10.1007/bf02596999>

- [5] Тазиефф, Х. (1984) Гора Нирагонго: возобновление активности Лавового озера. *Журнал вулканологии и геотермальных исследований*, 20, 267-280.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90043-x](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90043-x)
- [6] Гутенберг Б. (1956) Энергия землетрясений. *Ежеквартальный журнал*, 112, 1-14. .
<https://doi.org/10.1144/gsl.jgs.1956.112.01-04.02>
- [7] Гандо, А., и др. (2011) Частичная модель радиогенного тепла для Земли, выявленная с помощью измерений геонейтрино. *Nature Геология*, 4, 647-651.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1205>
- [8] Абэ С., Асами С., Эйзука М., Футаги С., Гандо А., Гандо Й., и др. (2022) Оценка содержания урана и тория в Земле с помощью спектроскопии геонейтрино. *Письма о геофизических исследованиях*, 49, e2022GL099566.
<https://doi.org/10.1029/2022gl099566>
- [9] Поланд, М.П., Саттон, А.Дж. и Герлах, Т.М. (2009) Дегазация магмы, вызванная статической декомпрессией на вулкане Килауэа, Гавайи. *Geophysical Research Letters*, 36, L16306.
<https://doi.org/10.1029/2009gl039214>
- [10] Тьерри Р. и Меркурий Л. (2009) Взрывоопасные свойства воды в вулканических и гидротермальных системах. *Журнал : Твердая Земля*, 114, B05205.
<https://doi.org/10.1029/2008jb005742>
- [11] Пикок Дж. Р., Манган М. Т., Уолтерс М., Хартлайн К., Глен Дж., Эрнст Т. и Шермерхорн У. (2019) Геофизическая характеристика источника тепла в гейзерах Северо-Запада, Калифорния. *Продолжениеработы 44-го семинара по разработке геотермальных резервуаров*, Стэнфорд, 11-13 февраля 2019 г., SGP-TR-214.
- [12] Паппатерра С., Ингуаджиато К., Руве Д., Мора-Амадор Р., Рамирес-Уманья К., Гонсалес Г., и др. (2022) Вариации редкоземельных элементов в гиперкислотном кратерном озере и их связь с изменениями в деятельности фумарол, физико-химических параметрах и химическом составе: на примере вулкана Поас (Коста-Рика). *Рубежи в науке Земле*, 9, Идентификатор статьи: 716970.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.716970>
- [13] Бузетти М., Гелетти Р., Чивиле Д., Саули К., Бранкателли Г., Форлин Э., и др. (2024) Геофизические свидетельства частого возникновения грязевых вулканов, связанных с системой газопроводов в море Росса (Антарктида). *Географические науки Границы*, 15, идентификатор статьи: 101727.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101727>
- [14] Теофанус, Т.Г., Юэн, У.У., Фримен, К. и Чен, К. (1996) Распространение паровых взрывов: исследования по верификации ESPROSE.m, DOE/ID-10503. Калифорнийский университет.
- [15] Гилат, А.Л., Мавродиев, С.С. и Вол, А. (2019) Гипотетическая физика и химия извержений вулканов: Путь к их прогнозированию. *Международный журнал по наукам о земле*, 10, 377-404.
<https://doi.org/10.4236/ijg.2019.104022>
- [16] Рамирес, К.В., Ромеро, Ю.В. и Ромеро, М.В. (2023) Теория вулканической энергии (расширенное английское издание). *Современные науки журнал*, 12, 76-86.
- [17] Вол, А. (2014) Термоэлектрохимические процессы дегазации Земли, создающие геомагнитное поле и изменяющие его величину и направление (термодинамический подход). *Международный журнал по наукам о земле*, 5, 1219-1230.
<https://doi.org/10.4236/ijg.2014.510101>
- [18] Хассан Дж., Хан Ф., Амиотт П. и Фердоус Р. (2014) Модель для оценки вероятности возникновения пылевого взрыва. *Журнал об опасных материалах*, 268, 140-149.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.017>
- [19] Клебанофф Л.Э., Пратт Дж.У. и ЛаФлёр К.Б. (2016) Сравнение физических свойств и

характеристик горения жидкого водорода и сжиженного природного газа в контексте высокоскоростного парама на топливных элементах SF-Breeze. Sandia National Laboratories.

- [20] Шмельц, Дж. Т., Римс, Д. В., фон Штайгер, Р. и Басу, С. (2012) Состав солнечной короны, солнечного ветра и солнечных энергичных частиц. *The Astrophysical Journal*, 755, статья № 33.
<https://doi.org/10.1088/0004-637x/755/1/33>
- [21] Олсон П. и Шарп З.Д. (2018) Поглощение водорода и гелия во время аккреции планет Земной группы. *Земные и планетарные научные письма*, 498, 418-426.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.07.006>
- [22] Олсон, П.Л. и Шарп, З.Д. (2022) Обмен первичным гелием-3 между ядром и мантией Земли. *Геохимия, Геофизика, Геосистемы*, 23, e2021GC009985.
<https://doi.org/10.1029/2021gc009985>
- [23] Гюстен Р., Виземейер Х., Нойфельд Д., Ментен К.М., Граф У.У., Джейкобс К., и др. (2019) Астрофизическое обнаружение иона гидрида гелия HeH⁺. *Nature*, 568, 357-359.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1090-x>
- [24] Фортенберри, Р.К. и Визенфельд, Л. (2020) Молекулярная свеча, в которой сияют немногие молекулы: HeHNe⁺. *Molecules*, 25, статья № 2183.
<https://doi.org/10.3390/molecules25092183>
- [25] Кендзиера, Д., Раугут, Г. и Часар, А.Г. (2022) Структура, энергетика и спектроскопия хромофоров кластеров HHe⁺ n, H₂He⁺ n и He⁺ n и их дейтерированных изотопологов. *Физическая химия Химическая физика*, 24, 12176-12195.
<https://doi.org/10.1039/d1cp05535f>
- [26] Тагава С., Сакамото Н., Хиросэ К., Ёкоо С., Хернлунд Дж., Охиси Ю., и др. (2021) Экспериментальные доказательства проникновения водорода в ядро Земли. *Nature Communications*, 12, статья № 2588.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0>
- [27] Румянцев, В.Н. (2016) Водород во внешнем ядре Земли и его роль в геодинамике глубинных недр. *Геодинамика и Тектонофизика*, 7, 119-135.
<https://doi.org/10.5800/gt-2016-7-1-0200>
- [28] Серовайский, А. и Кучеров, В. (2020) Формирование сложных углеводородных систем из метана в термобарических условиях верхней мантии. *Научные отчёты*, 10, статья № 4559.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61644-5>
- [29] Хиршманн, М.М. (2023) Кислородный цикл в глубинных слоях Земли: соображения о балансе масс в отношении происхождения и эволюции окислительных резервуаров в мантии и на поверхности. *Earth and Planetary Science Letters*, 619, статья ID: 118311.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118311>
- [30] Лин, Й. и ван Вестренен, У. (2021) Кислород как катализатор в недрах Земли? *National Science Review*, 8, nwab009.
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwab009>
- [31] Синохара Х., Йокоо А. и Казахая Р. (2018) Изменение состава вулканических газов во время извержения в 2014–2015 годах в кратере Накадаке, вулкан Асо, Япония. *Земля, планеты и космос*, 70, статья № 151.
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0919-0>
- [32] Субраманиан, Р. (2020) Технический циркуляр DGMS № 04 от 2020 года, Дханбад, 24 февраля, Правительство Индии, Министерство труда и занятости, Главное управление по безопасности на шахтах.
- [33] Томас Г. (2012) Некоторые наблюдения по инициированию и началу детонации. *Философские операции, из - за Королевского общества является: математических, физических и технических наук*,

- 370, 715-739.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0368>
- [34] Sun, X., Yan, C., Yan, Y., Mi, X., Lee, J.H.S. и Дик Нг, Х. (2022) Критический диаметр трубы для квазидетонации. *Горение и пламя*, 244, статья ID: 112280.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112280>
- [35] Чжан Б., Нг Х.Д. и Ли Дж.Х.С. (2012) Критический диаметр трубки и критическая энергия для прямого инициирования детонации в смесях $C_2H_2/N_2O/Ar$. *Горение и пламя*, 159, 2944-2953.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.06.010>
- [36] Шредер В. и Холтаппелс К. (2005) Характеристики взрыва водородно-воздушных и водородно-кислородных смесей при повышенном давлении (статья для конференции).
<https://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120001.pdf>
- [37] Пэн, Ю. и Дэн, Дж. (2024) Диффузия водорода в Нижней мантии, выявленная с помощью возможностей машинного обучения. *Журнал : Твердая Земля*, 129, e2023JB028333.
<https://doi.org/10.1029/2023jb028333>
- [38] Маццола Дж., Хеллед Р. и Сорелла С. (2018) Фазовая диаграмма водорода и водородно-гелиевой смеси в планетарных условиях, полученная с помощью квантового моделирования методом Монте-Карло. *Physical Review Letters*, 120, статья ID: 025701.
<https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.025701>
- [39] Перон С., Морейра М. и Агранье А. (2018) Происхождение лёгких инертных газов (He, Ne и Ar) на Земле: обзор. *Геохимия, Геофизика, Геосистемы*, 19, 979-996.
<https://doi.org/10.1002/2017gc007388>
- [40] Мукхопадхьяй С. и Параи Р. (2019) Благородные газы: отчет об эволюции Земли и динамике мантии. *Ежегодный обзор о Земле и планетах*, 47, 389-419.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060238>
- [41] Санлуп, К. (2020) Реакционная способность благородных газов в недрах планет. *Границы в физике*, 8, статья № 157.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00157>
- [42] Спэндерл, К., Слезак, П. и Назари-Дехкорди, Т. (2020) Тектоническое значение месторождений редкоземельных элементов в Австралии. *Земля-наука обзоры*, 207, статья ID: 103219.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103219>
- [43] Стивенсон, Д. Дж. и Зальпетер, Э. Э. (1977) Фазовая диаграмма и транспортные свойства водородно-гелиевых жидких планет. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 35, 221-237.
<https://doi.org/10.1086/190478>
- [44] Карато, С. (1990) Роль водорода в электропроводности верхней мантии. *Nature*, 347, 272-273.
<https://doi.org/10.1038/347272a0>
- [45] Карато, С. (2006) Дистанционное зондирование водорода в мантии Земли. *Обзоры по минералогии и геохимии*, 62, 343-375.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2006.62.15>
- [46] Карато С. и Ван Д. (2013) Глава 5. Электропроводность минералов и горных пород. В: Карато, С., Изд., "Физика и химия", Джон Уайли и сыновья.
- [47] Гуфельд И.Л. и Матвеева М.И. (2011) Барьерный эффект дегазации и разрушения земной коры. *Доклады РАН Науки о Земле*, 438, 677-680.
<https://doi.org/10.1134/s1028334x11050199>
- [48] Гуфельд, И.Л. (2012) Геологические последствия аморфизации литосферы и структур верхней мантии, вызванные дегазацией водорода. *Геодинамика и Тектонофизика*, 3, 417-435.
<https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-4-0083>

- [49] Фомин И. и Шиффер К. (2019) Вода, гидротермальное плавление и телесеismicческие признаки переходной зоны мантии. *Геонауки*, 9, статья № 505.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9120505>
- [50] Мишин Ю., Софронис П. и Бассани Дж. Л. (2002) Термодинамические и кинетические аспекты межфазной декогезии. *Acta Materialia*, 50, 3609-3622.
[https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(02\)00165-9](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(02)00165-9)
- [51] Сонг Дж. и Кертин У.А. (2012) Атомный механизм и прогнозирование водородного охрупчивания железа. *Nature Materials*, 12, 145-151.
<https://doi.org/10.1038/nmat3479>
- [52] Лан Х., Мартин К.Д. и Ху Б. (2010) Влияние неоднородности хрупкой породы на микромеханическое поведение при растяжении при сжатии. *Журнал : Твердая Земля*, 115, B01202.
<https://doi.org/10.1029/2009jb006496>
- [53] Ли, К., Пан, Л., Чжан, Л., Крис А., М. и Галанг, А.Г. (2023) Локализация деформации и распространение трещин в песчанике с различными углами наклона трещин при разных скоростях нагружения. *Frontiers in Earth Science*, 11, статья ID: 1322992.
<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1322992>
- [54] Салас-Рейес, А.Э., Кабан, А. и Минц, Б. (2024) Комментарии к статье «Осреднение металлов и сплавов при промежуточных температурах: условия транскристаллитного и межкристаллитного разрушения». *Металлы*, 14, статья № 270.
<https://doi.org/10.3390/met14030270>
- [55] Гюльдемайстер Н., Вюннеманн К., Дурр Н. и Хирмайер С. (2012) Распространение ударных волн в пористом песчанике с использованием мезомасштабного моделирования. *Метеоритика и планетарные науки*, 48, 115-133.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01430.x>
- [56] Шольц, К.Х., Тан, Й.Дж. и Альбино, Ф. (2019) Механизм приливного инициирования землетрясений на срединно-океанических хребтах. *Nature Communications*, 10, статья № 2526.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-10605-2>
- [57] Закканьино Д. и Дольони К. (2022) Градиенты Земли как движущая сила тектоники плит и землетрясений. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 45, 801-881.
<https://doi.org/10.1007/s40766-022-00038-x>
- [58] Лю, Л. и Чжан, Дж. С. (2015) Дифференциальное сжатие погружающихся слоёв литосферы вызывает глубокие землетрясения. *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 98-106.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.03.053>
- [59] Кулинич Ю., Новосядлый Б., Шульга В. и Хан В. (2020) Тепловое и резонансное излучение гало тёмного века в ротационных линиях HeH⁺. *Physical Review D*, 101, статья ID: 083519.
<https://doi.org/10.1103/physrevd.101.083519>
- [60] Новосядлый Б., Кулинич Ю., Мелех Б. и Шульга В. (2022) Первые молекулы в межгалактической среде и гало в тёмные века и на заре Вселенной. *Астрономия и Астрофизика*, 663, A120.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243238>
- [61] Чжоу, У., Хао, М., Чжан, Дж. С., Чен, Б., Ван, Р. и Шмандт, Б. (2022) Ограничение состава и температурных колебаний в переходной зоне мантии. *Nature Communications*, 13, статья № 1094.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-28709-7>
- [62] Шэкелфорд, Дж. Ф. (2014) Растворимость газов и диффузия в оксидных стеклах — влияние на формы ядерных отходов. *Procedia Materials Science*, 7, 278-285.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.10.036>
- [63] Амальберти Дж., Бёрнард П., Лапорт Д., Тиссанье Л. и Неввиль Д.Р. (2016) Механизмы

- мультидиффузии благородных газов (He, Ne, Ar) в силикатных стёклах и расплавах в области температур перехода: влияние на полимеризацию стекла. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 172, 107-126.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.09.027>
- [64] Власов К., Аудет А. и Кепплер Х. (2023) H₂-H₂ Несмешиваемость в верхней мантии Земли. *Вклады в минералогию и петрологию*, 178, Статья № 36.
<https://doi.org/10.1007/s00410-023-02019-7>
- [65] Худак И., Скрыя П., Бояновски Й., Егла З. и Княвек М. (2021) Влияние инертных топливных соединений на характеристики пламени. *Energies*, 15, статья № 262.
<https://doi.org/10.3390/en15010262>
- [66] Чен, Дж. (2024) Влияние благородных газов на транспортные и термодинамические характеристики микроканальных реакторов риформинга для производства водорода. *Международный журнал по водородной энергетике*, 50, 654-671.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.365>
- [67] Дружбин Д., Фей Х. и Кацура Т. (2021) Независимое включение водорода в вадслейит от летучести кислорода и недиссоциация H₂O в восстановительной переходной зоне мантии. *Earth и планетарные научные письма*, 557, Идентификатор статьи: 116755.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116755>
- [68] Охтани, Э. (2019) Роль воды в мантии Земли. *National Science Review*, 7, 224-232.
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwz071>
- [69] Уильямс, К. и Хемли, Р. Дж. (2001) Водород в глубинах Земли. *Ежегодный обзор о Земле и планетах*, 29, 365-418.
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.365>
- [70] Ху, К., Ким, Д.Й., Янг, У., Янг, Л., Мэн, Ю., Чжан, Л., и др. (2016) FeO₂ и FeOOH в условиях глубинной нижней мантии и кислородно-водородные циклы Земли. *Nature*, 534, 241-244.
<https://doi.org/10.1038/nature18018>
- [71] Постников А.В., Уваров И.В., Проказников А.В. и Световой В.Б. (2016) Наблюдение за самопроизвольным горением водорода и кислорода в микропузырьках. *Прикладная физика Письма*, 108, статья ID: 121604.
<https://doi.org/10.1063/1.4944780>
- [72] Световой, В.Б., Проказников, А.В., Постников, А.В., Уваров, И.В. и Палазанзас, Г. (2019) Взрыв микропузырьков, образующихся при электролизе воды переменным током. *Energies*, 13, статья № 20.
<https://doi.org/10.3390/en13010020>
- [73] Вада И., Бен М.Д. и Хе Дж. (2011) Распределение зерен по размерам в мантийном клине зон субдукции. *Журнал*, 116, B10203.
<https://doi.org/10.1029/2011jb008294>
- [74] Серпа, Н.Г., Вада, И. и Уилсон, К. Р. (2017) Миграция жидкости в мантийном клине: влияние размера минеральных зерен и уплотнения мантии. *Журнал : Твердая Земля*, 122, 6247-6268.
<https://doi.org/10.1002/2017jb014046>
- [75] Хэ, Ю., Ким, Д.Ю., Стружкин, В.В., Гебалле, З.М., Пракапенка, В. и Мао, Х. (2023) Стабильность FeH и перенос водорода на границе ядра и мантии Земли. *Наука Бюллетень*, 68, 1567-1573.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.06.012>
- [76] Чжан Л., Чжан Л., Тан М., Ван С., Тао Р., Сюй Ц., и др. (2022) Массовое абиотическое производство метана в эклогите во время холодной субдукции. *National Science Review*, 10, nwac207.
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwac207>
- [77] Андерсон, Д.Л. (2009) Энергетика Земли и загадка недостающего источника тепла. Технический отчет, Сейсмологическая лаборатория, Калифорнийский

технологический институт.

- [78] Терез, Э.И. и Терез, И.Э. (2013) Термоядерная реакция как основной источник энергии Земли. *Международный журнал астрономии и астрофизики*, 3, 362-365.
<https://doi.org/10.4236/ijaa.2013.33040>
- [79] Терез, Э.И. и Терез, И.Э. (2015) Термоядерные реакции как основной источник внутренней энергии Земли. *Вестник Российской академии наук*, 85, 163-169.
<https://doi.org/10.1134/s1019331615020070>
- [80] Дай, С.Т. (2012) Геонейтрино и радиоактивная энергия Земли. *Обзоры по геофизике*, 50, RG3007.
<https://doi.org/10.1029/2012rg000400>
- [81] Фукухара, М. (2016) Возможное выделение тепла в результате ядерного синтеза во внутреннем ядре Земли. *Научные отчёты*, 6, статья № 37740.
<https://doi.org/10.1038/srep37740>
- [82] Фукухара, М. (2020) Возможный ядерный синтез дейтерия в ядрах Земли, Юпитера, Сатурна и коричневых карликов. *AIP Достижения*, 10, идентификатор статьи: 035126.
<https://doi.org/10.1063/1.5108922>
- [83] Бычков С. (2020) Магма как генератор плазмы и термоядерного синтеза в недрах Земли. *SSRN Электронный журнал*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3738328>
- [84] Зеленский В.Ф., Рыбалко В.Ф., Толстолуцкая Г.Д., Пистряк С.В., Копанец И.Е. и Морозов А.Н. (1994) Инициирование реакций ядерного синтеза в системах металл-дейтерий и металл-дейтерий + тритий бомбардировкой ионами инертных газов. *Fusion Technology*, 25, 95-102.
<https://doi.org/10.13182/fst94-a30238>
- [85] Сада, Х. (1997) Теория ядерных реакций в твёрдых телах. *Fusion Technology*, 32, 107-125.
<https://doi.org/10.13182/fst97-a19883>
- [86] Пайнс, В., Пайнс, М., Чайт, А., Штайнез, Б.М., Форсли, Л.П., Хендрикс, Р.К., и др. (2020) Реакции ядерного синтеза в дейтерированных металлах. *Physical Review C*, 101, статья ID: 044609.
<https://doi.org/10.1103/physrevc.101.044609>
- [87] Штайнез, Б.М., Беньо, Т.Л., Чейт, А., Хендрикс, Р.К., Форсли, Л.П., Барамсай, Б., и др. (2020) Новые ядерные реакции, наблюдаемые в дейтерированных металлах, облученных тормозным излучением. *Physical Review C*, 101, статья ID: 044619.
<https://doi.org/10.1103/physrevc.101.044610>
- [88] Дорнхайм, Т., Грот, С. и Бониц, М. (2018) Однородный электронный газ в условиях тёплой плотной материи. *Физика Доклады*, 744, 1-86.
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.04.001>
- [89] Гарднер Дж. Э., Уодсворт Ф. Б., Карли Т. Л., Ллевеллин Э. У., Кусумаатмаджа Х. и Сахагиан Д. (2023) Образование пузырьков в магме. *Ежегодный обзор о Земле и планетах*, 51, 131-154.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031621-080308>
- [90] Давыдов М.Н., Кедринский В.К., Чернов А.А. и Такаяма К. (2005) Генерация и эволюция кавитации в магме при динамической разгрузке. *Журнал прикладной механики и технической физики*, 46, 208-215.
<https://doi.org/10.1007/s10808-005-0036-2>
- [91] Грациани Ф., Молдабеков З., Олсон Б. и Бониц М. (2022) Физика ударных волн в тёплой плотной среде: взгляд квантовой гидродинамики. *Вклад в физику плазмы*, 62, e202100170.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.202100170>
- [92] Уайт, Т.Г., Дай, Дж. и Райли, Д. (2023) Динамические и переходные процессы в тёплой плотной материи. *Философские операции, из -*

- за Королевского общества является: математических, физических и технических наук, 381, код статьи: 20220223.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0223>
- [93] Армор, Э.А.Г. (2007) Муон-катализируемый синтез, научный симпозиум NASA GSFC по атомной и молекулярной физике.
- [94] Козима Х. и Каки К. (2000) Аномальные ядерные реакции в твёрдых телах, выявленные с помощью CF-экспериментов. Доклад факультета естественных наук Университета Сидзуока, том 34, 1-35.
- [95] Козима, Х. (2003) CF-материя и феномен холодного синтеза. 10я Международная конференция по холодному синтезу.
- [96] Касаги, Дж. (2004) Низкоэнергетические ядерные реакции в металлах. *Прогресс в теоретической физике Приложение*, 154, 365-372.
<https://doi.org/10.1143/ptps.154.365>
- [97] Касаги Дж. и Хонда Ю. (2016) Экранирование энергии реакции $D + D$ в электронной плазме, полученной из совместной реакции столкновения. *Журнал ядерной науки о конденсированном веществе*, 19, 127-134.
<https://doi.org/10.70923/001c.72381>
- [98] Касаги Дж., Хонда Ю. и Фанг К. (2020) Энергия экранирования для низкоэнергетических ядерных реакций в конденсированной среде. В книге: Биберян Ж.-П., ред., *Холодный синтез*, Эльзевир, 167-187.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815944-6.00010-5>
- [99] Джайтнер, Л. (2015-2019) Физика конденсированных плазмOIDов и низкоэнергетических ядерных реакций (LENR).
https://condensed-plasmoids.com/condensed_plasmoids_lenr.pdf
- [100] Метцлер Ф., Хант К. и Гальванетто Н. (2022) Известные механизмы, повышающие скорость ядерного синтеза в твёрдом состоянии.
- [101] Пархомов А.Г. и Белоусова Е.О. (2022) Огромное разнообразие нуклидов, возникающих в процессах LENR: попытка объяснения. *Журнал современной физики*, 13, 274-284.
<https://doi.org/10.4236/jmp.2022.133019>
- [102] Барталуччи С., Высоцкий В.И. и Высоцкий М.В. (2019) Коррелированные состояния и ядерные реакции: экспериментальное исследование с использованием пучков низкой энергии. *Physical Review Accelerators and Beams*, 22, статья ID: 054503.
<https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.22.054503>
- [103] Вэй, Й. (2017) Коллективная низкоэнергетическая ядерная реакция может привести к сверхединичности при водном взрыве Грано.
- [104] Ли И. и Диас-Торрес А. (2022) Динамика когерентности в низкоэнергетическом ядерном синтезе. *Письма в журнал «Физика Б»*, 827, статья ID: 136970.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.136970>
- [105] Оганесян, Ю. (2006) Синтез и свойства распада сверхтяжелых элементов. *Чистая и прикладная химия*, 78, 889-904.
<https://doi.org/10.1351/pac200678050889>
- [106] Рид, Дж. У., Кигоши, К. и Туркевич, А. (1960) Определение концентрации тяжелых элементов в метеоритах методом активационного анализа. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 20, 122-140.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(60)90055-7)
- [107] Саттл, М.Д., Фолко, Л., Дионне, З., Ван Гиннекен, М., Ди Рокко, Т., Пэк, А., и др. (2022) Изотопно-тяжелые микрометеориты — фрагменты ци-си-хондрита или нового водного родительского тела? *Журнал геофизических исследований: Планеты*, 127, e2021JE007154.
<https://doi.org/10.1029/2021je007154>
- [108] ван Гиннекен, М., Вознякевич, П.Дж., Браунли, Д.Э., Дебайль, В., Делла Корте, В., Делош, Л., и др. (2024) Коллекции микрометеоритов: обзор и их текущее

состояние. *Философские операции*, из - за Королевского общества является: математических, физических и технических наук, 382, код статьи: 20230195.

<https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0195>

- [109] Аркулус, Р. (2016) Космическое происхождение урана. Всемирная ядерная ассоциация. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/the-cosmic-origins-of-uranium.aspx>
- [110] Пэрриш Р. (2014) Уран-свинцовое датирование. В: Ринк, У. и Томпсон, Дж., ред., *Энциклопедия научных методов датирования*, Спрингер, 1-16. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_193-1
- [111] USGS Publications Warehouse (2001, 13 июня) Радиометрическая шкала времени. <https://pubs.usgs.gov/gip/geotime/radiometric.html>
- [112] Кларк, Р.С., Роу, М.У., Ганапати, Р. и Курода, П.К. (1967) Содержание йода, урана и теллура в метеоритах. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 1605-1613. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90109-3)
- [113] Морган, Дж. У. и Ловеринг, Дж. Ф. (1968) Содержание урана и тория в хондритовых метеоритах. *Talanta*, 15, 1079-1095. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(68\)80031-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(68)80031-1)
- [114] Тацумото, М., Найт, Р.Дж. и Аллегре, К.Дж. (1973) Различия во времени образования метеоритов, определяемые по соотношению свинца-207 и свинца-206. *Science*, 180, 1279-1283. <https://doi.org/10.1126/science.180.4092.1279>
- [115] Бреннека, Г.А. и Вадхва, М. (2012) Изотопный состав урана базальтовых ангритовых метеоритов и хронологические последствия для ранней Солнечной системы. *Труды Национальной академии наук*, 109, 9299-9303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1114043109>
- [116] Моромото Н., Каваи Ю., Терада К., Мияхара М., Такахата Н., Сано Ю., и др. (2023) Ураново-свинцовая систематика лунного базальтового метеорита Северо-Западная Африка 2977. *Масс-спектрометрия*, 12, A0115. <https://doi.org/10.5702/massspectrometry.a0115>
- [117] Мерти, В.Р. и Паттерсон, К.С. (1962) Первичная изохрона нулевого возраста метеоритов и Земли. *Журнал*, 67, 1161-1167. <https://doi.org/10.1029/jz067i003p01161>
- [118] Лайонс Дж.Б., Алейников Дж.Н. и Зартман Р.Э. (1986) Уран-торий-свинцовый возраст плутонической свиты Хайлендкрофт, Северная часть Новой Англии. *Американский журнал*, 286, 489-509. <https://doi.org/10.2475/ajs.286.6.489>
- [119] Скотт, Э. (2020) Железные метеориты: состав, возраст и происхождение. В: прочитайте п., и соавт., Ред., *Оксфорд исследований энциклопедии на планетарной науки*, Оксфорд Университи пресс, ст. 206.
- [120] Шиллер М., Патон К. и Биззарро М. (2015) Доказательства нуклеосинтетического обогащения ядра протосолнечного молекулярного облака в результате многократных вспышек сверхновых. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 149, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.11.005>
- [121] Хилтон, К.Д., Бермингем, К.Р., Уокер, Р.Дж. и Маккой, Т.Дж. (2019) Генетика, последовательность кристаллизации и возраст железных метеоритов Южного Байронского трио: новые данные о родительских телах углеродистых хондритов (CC). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 251, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.02.035>
- [122] Не, Н.С., Ван, Д., Торрано, З.А., Карлсон, Р.В., О'Д. Александер, К.М. и Шахар, А. (2023) Метеориты унаследовали нуклеосинтетические аномалии калия-40, образовавшегося в сверхновых. *Science*, 379, 372-376.

- <https://doi.org/10.1126/science.abn1783>
- [123] Мартинс, Р., Кутнинг, С., Коулз, Б.Дж., Крайссиг, К. и Реккемпер, М. (2023) Ядерно-синтетические изотопные аномалии цинка в метеоритах ограничивают происхождение летучих веществ на Земле. *Science*, 379, 369-372.
<https://doi.org/10.1126/science.abn1021>
- [124] Лугаро М., Отт У. и Керестури А. (2018) Радиоактивные ядра от космохронологии к обитаемости. *Прогресс в частиц и ядерной*, 102, 1-47.
<https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2018.05.002>
- [125] Скитта, П., Мятта, М., Пииппо, С., Кара, Дж., Капьяхо, А., Хейлимо, Э., и др.. (2020) Ограничения на возраст магматизма и последующую деформацию неоархейского гнейсового комплекса Куккола, Северная Фенноскандия. *Бюллетень Геологического общества Финляндии*, 92, 19-38.
<https://doi.org/10.17741/bgsf/92.1.002>
- [126] Голдич, С.С., Хедж, К.Э. и Стерн, Т.В. (1970) Возраст гнейсов Мортон и Монтевидео и родственных пород, Юго-западная Миннесота. *Бюллетень Геологического общества Америки*, 81, 3671-3696.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[3671:aotmam\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[3671:aotmam]2.0.co;2)
- [127] Тиммерман С., Стейчел Т., Корнниф Дж. М., Смит К. В., Харлоу Р., Ноуэлл Г. М., и др. (2023) Возраст алмазов в сублитосфере и цикл суперконтинентов. *Nature*, 623, 752-756.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06662-9>
- [128] Брусницын А.И., Жуков И.Г. (2005) Южно-Файзулинское марганцевое месторождение на Южном Урале: геология, петрография и условия формирования. *Литология и минеральные ресурсы*, 40, 30-47.
<https://doi.org/10.1007/s10987-005-0004-1>
- [129] Фролов, А.А. (1994) Рудоносные вулканогенные структуры. «Недра», 285 с. (на русском языке)
- [130] Силлитоу, Р.Х. и Бонэм, Х.Ф. (1984) Вулканические формы рельефа и рудные месторождения. *Экономическая геология*, 79, 1286-1298.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.6.1286>
- [131] Силлитоу, Р.Х. (2000) Богатые золотом месторождения порфиров: описательные и генетические модели и их роль в разведке и открытии месторождений. *SEG Обзоры*, 13, 315-345.
- [132] Аль-Ани, Т., Молнар, Ф., Линтинен, П. и Лейнонен, С. (2018) Геология и минералогия месторождений и проявлений редкоземельных элементов в Финляндии. *Минералы*, 8, статья № 356.
<https://doi.org/10.3390/min8080356>
- [133] Коржинский, М.А., Ткаченко, С.И., Шмулович, К.И., Таран, Ю.А. и Штейнберг, Г.С. (1994) Открытие чистого минерала рения на вулкане Кудрявый. *Nature*, 369, 51-52.
<https://doi.org/10.1038/369051a0>
- [134] Распределение запасов урана в мире (UDEPO) (2018).
<https://www.iaea.org/publications/12345/world-distribution-of-uranium-deposits-udepo>
- [135] Гарсия, А.С., Латифи, М., Амини, А. и Чауки, Дж. (2020) Отделение радиоактивных элементов от минералов, содержащих редкоземельные элементы. *Металлы*, 10, статья № 1524.
<https://doi.org/10.3390/met10111524>
- [136] Баларам, В. (2022) Месторождения редкоземельных элементов: источники и стратегии разведки. *Журнал Геологического общества Индии*, 98, 1210-1216.
<https://doi.org/10.1007/s12594-022-2154-3>
- [137] Патель, К.С., Шарма, С., Майти, Дж.П., Мартин-Рамос, П., Фикет, Ж., Бхаттачарья, П., и др. (2023) Распространение урана, тория и редкоземельных элементов в окружающей среде: обзор. *Frontiers in Environmental Science*, 10, статья ID: 1058053.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058053>

- [138] Страхимир Чтерев, М. и Александр, В. (2019) Улучшенная численная обобщенная формула массы Бете-Вейцеккера для прогнозирования изотопной ядерной массы, избытка массы, в том числе для искусственных элементов 119 и 120. *Ядерная наука*, 4, 11-22.
<https://doi.org/10.11648/j.ns.20190402.11>
- [139] Гофф Ф. и Макмертри Г.М. (2000) Тритий и стабильные изотопы магматических вод. *Журнал вулканологии и геотермальных исследований*, 97, 347-396.
[https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(99\)00177-8](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00177-8)
- [140] Цзян С., Хэ М., Юэ У. и Лю Дж. (2008) Тритий, высвобождающийся из мантийного источника: последствия для естественного ядерного синтеза в недрах Земли. *Журнал «Термоядерная энергия»*, 27, 346-354.
<https://doi.org/10.1007/s10894-008-9149-y>
- [141] Алонсо М., Перес Н.М., Эрнандес П.А., Падрон Э., Мелиан Г., Родригес Ф., и др. (2022) Тепловая энергия и диффузное дегазирование ^4He и ^3He в вулканических геотермальных системах. *Возобновляемая энергия*, 182, 17-31.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.016>
- [142] МакМёртри, Г.М., Дасилвейра, Л.А., Хорн, Э.Л., ДеЛуз, Дж.Р. и Блессинг, Дж.Э. (2019) Высокие соотношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в паровых источниках Нижней Восточной рифтовой зоны предшествуют новой фазе извержения Килауэа в 2018 году за 8 месяцев. *Научные отчёты*, 9, статья № 11860.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48268-0>
- [143] Пурсело, Л., Леон Винтро, Л., Митчелл, П.И., Буркитбаев, М., Уралбеков, Б., Болатов, А., и др. (2013) Гидрологическое поведение трития на бывшем Семипалатинском ядерном полигоне (Казахстан), определенное с помощью измерений стабильных изотопов. *Евразийский химико-технологический журнал*, 15, 293-299.
<https://doi.org/10.18321/ectj234>
- [144] Джексон, Т.Р. (2021) Проницаемые пути грунтовых вод и закономерности миграции трития в результате подземного ядерного испытания Хэндли, Пахут-Меса, Невада. Отчет о научных исследованиях 2021-5032.
<https://doi.org/10.3133/sir20215032>
- [145] Тимонова Л., Ларионова Н., Айдарханова А., Ляхова О., Актаев М., Сержанова З., и др. (2024) Распределение трития в системе «вода-почва-воздух» на Семипалатинском испытательном полигоне. *PLOS ONE*, 19, e0297017.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297017>
- [146] Актаев М., Субботин С., Айдарханов А., Айдарханова А., Тимонова Л. и Ларионова Н. (2024) Характеристика геологических и литологических особенностей в районе, прилегающем к грунтовым водам, загрязненным тритием, на Семипалатинском испытательном полигоне. *PLOS ONE*, 19, e0300971.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>