РАЗДЕЛ X. ФИЗИКА

Кошман В.С.

От закона всемирного тяготения к сценарию космологической эволюции Вселенной

ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет»

(Россия, Пермь)

doi: 10.18411/trnio-11-2021-76

Аннотация

В работе в согласии с законами физики в их записи с учетом рекомендации Ц. Бартона отмечено, что на планковское мгновение времени расширяющийся сгусток материи распадается на удаленные друг от друга материальные части, а также во Вселенной возникают и гравитационное взаимодействие, и электромагнитное поле, которое имеет регистрируемый сегодня спектр излучения абсолютно черного тела. Также в работе приведены аргументы в защиту мнения о том, что ныне реликтовые фотоны возникли сразу же вслед за эпохой Планка за ограниченный период времени.

Ключевые слова: единство необходимого и случайного, модель Вселенной, реликтовое излучение, планковские величины, законы физики, гравитационное взаимодействие.

Abstract

In the work, in accordance with the laws of physics, in their record, taking into account the recommendation of C. Barton, it was noted that at the Planck instant of time, an expanding clot of matter decays into material parts that are distant from each other, and also gravitational interaction and an electromagnetic field arise in the Universe, which has the spectrum of radiation of a completely black body recorded today. The paper also presents arguments in defense of the opinion that now relic photons appeared immediately after the Planck epoch for a limited period of time.

Keywords: the unity of the necessary and the accidental, the model of the universe, relic radiation, Planck quantities, laws of physics, gravitational interaction.

Если в начале XX столетия идеи эволюции Вселенной в физике играли лишь относительно узкую роль, то начиная, пожалуй, с середины 1960 – х годов они представляют неуклонно возрастающий интерес. Со временем пришло осознание того, что «единство необходимого и случайного составляет самую сущность эволюции и тем самым составляет центральный пункт теории» [1].

Задача реконструкции особенностей движения Вселенной пока не имеет окончательного решения. Исследуется ситуация рождения мира из «ничего». Согласно известному мнению, естественно ожидать, что Вселенная рождается со средним объемом, который близок к планковскому объему $V_{pl} = L_{pl}^3$, «остальные параметры тоже имеют характерные планковские величины...», хотя полная масса родившегося замкнутого мира равна нулю, положительная часть этой полной массы – масса вещества – составляет $\sim m_{pl} = 10^{-5} \text{ г.}$ [2]. В локальной форме закон сохранения энергии записывается как $dE = -pdV$, где p – абсолютное давление есть величина отрицательная: $p < 0$ (причем при $p < 0$ вещество антигравитирует, что и приводит к расширению мира), а действие вычисляется на решениях классических уравнений движения [2]. Есть и авторы, которые утверждают [3], что в природе отрицательных величин не бывает, а отрицательные величины характерны лишь только для математики.

Известны попытки сделать простоту и красоту физических законов универсальной, а авторы порой живут «с интуитивной верой в то, что законы физики должны быть красивыми» [4, с. 60]. Особые надежды возлагаются на построение теоретико - вакуумной

картины мира, а также создание теории струн (*cGh* – теории). В основном происхождение нашей Вселенной связывается с квантовыми флуктуациями физического вакуума, заменившими понятие сингулярности. Заметим, что поиск наилучших альтернатив сингулярности вполне объясним, поскольку аналитические решения, в которых физические величины оказываются равными бесконечности, лишены физического смысла. В квантовой теории, а также в атомной и ядерной физике при описании явлений в краю угла мы видим постоянную Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, которой изначально, то есть при ее введении в научный оборот, М. Планком отведена роль «элементарного кванта действия» [5]. В целях описания природы постоянная Планка h представляет заметный интерес.

Ниже для обсуждения предлагается алгоритм поиска возможного сценария эволюции Вселенной, узловые моменты алгоритма, а также результаты, которые следуют из него. Мы выделим законы физики как весомые результаты, установленные теоретически в полном согласии с опытными данными, а также фундаментальные физические постоянные и их размерные комбинации, выпишем математические выражения физических законов в форме, которая отвечает безразмерному описанию расширения Вселенной с охлаждением, отметим отдельные результаты исследования.

Законы физики. На протяжении тысяч лет математика является самым эффективным средством понимания, записи и предсказания космических событий [6, с. 9]. К 1687 году И. Ньютон вычислил силы, которые действуют и на яблоко, и на Луну, чтобы те двигались по своим разным по отношению к Земле маршрутам, выразил эти силы притяжения математическим уравнением, сформулировав закон природы, который известен как *закон всемирного тяготения* [7, 8 и др.]:

$$F_{\text{пр}} = G_H \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}; \quad (1)$$

$$G_H = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}. \quad (2)$$

Как видим, формула (1) связывает воедино силу притяжения $F_{\text{пр}}$ между двумя материальными точками, их массы m_1 и m_2 и их удаление r друг от друга. «Ньютон смог объяснить и предсказать множество небесных явлений. В более общем плане: он изменил наши представления о природном мире и произвел научную революцию, которая продолжает прокладывать нам путь и сегодня. Ньютон показал, что природные явления (часто) управляются математическими закономерностями и что разобравшись в этих закономерностях мы сможем лучше понять природу. Во времена Ньютона математические закономерности объясняли происходящее в небесах, но не имели сколь – нибудь существенных приложений, за исключением, пожалуй, навигации» [6, с. 10].

В 1964 году также в небесах было установлено наличие микроволнового космического фона, а позднее и его спектр излучения, который оказался спектром излучения абсолютно черного тела. Но именно для данного спектра также теоретически в 1899 году установлены *формула Планка* [5, 8 и др.]:

$$\frac{du_\varepsilon}{dv} dv = \frac{8\pi h v^3 dv}{c^3} \frac{1}{e^{h \cdot v / k_B T} - 1} \quad (3)$$

и *закон Стефана – Больцмана*, который выражает связь между объемной плотностью энергии электромагнитного излучения u_ε температурой T [8, 9 и др.]:

$$u_\varepsilon = \frac{U_\varepsilon}{V} = \frac{8\pi^6}{15} k \left(\frac{k}{ch} \right)^3 T^4, \quad (4)$$

и открытый по результатам лабораторных измерений.

Фундаментальные физические постоянные и их размерные комбинации, а также факты из наблюдательной астрономии. Выражения (1), (3) и (4) представлены в записи через фундаментальные физические постоянные (мировые константы): G_H - гравитационная постоянная; c - скорость света в вакууме; h - постоянная Планка и k_B - постоянная Больцмана. Согласно А. Эйнштейну, «подлинно физическое значение имеют только два макроскопических поля – гравитация и электромагнетизм» [10], своеобразные «отголоски» которых мы и видим в константах G_H , c , h и k_B . Именно через них М. Планк [11] предложил

«естественные единицы измерения»: $L_{pl} = \left(\frac{h \cdot G}{c^3}\right)^{\frac{1}{2}} = 10^{-35} \text{ м}$ - для длины, $m_{pl} = \left(\frac{h \cdot c}{G}\right)^{\frac{1}{2}} = 10^{-8} \text{ кг}$ - массы, $t_{pl} = \left(\frac{h \cdot G}{c^5}\right)^{\frac{1}{2}} = 10^{-43} \text{ с}$ - времени и $T_{pl} = \left(\frac{h \cdot c^5}{k_B^2 \cdot G}\right)^{1/2} = 10^{32} \text{ К}$ - температуры, которые он считал «справедливыми во все времена». Весомая роль мировых констант G_H , c , h и k_B в описании природных явлений не оспаривается [12], но вполне допускается [13] и вариант, когда $G_H = c = h = k_B = 1$.

Помимо реликтового фотонного изучения и его чернотельного спектра методами наблюдательной астрономии также достоверно установлен факт разбегания далеких галактик. По данным работы [14] за последние двадцать лет открыто 3700 экзопланетных (аналогичных солнечной) систем, находящихся, как полагают, на разных стадиях эволюции. Однако из традиционной формы записи физических законов – см. (1), (3) и (4) - не ясна допустимая глубина их погружения в интересующее нас космологическое прошлое.

К решению космологической задачи. Формулы (1), (3) и (4) отвечают лишь только «вершине айсберга». С целью прикоснуться к его основанию, пожалуй, необходимо прислушаться к мнению Ц. Бартона [15, с. 88]: «При изучении гравитации иногда удобно использовать «планковскую» систему единиц». Бартон обращает внимание на размерность трех фундаментальных констант G_H , c и h , что в планковских единицах дает

$$G_H = \frac{L_{pl}^3}{m_{pl} \cdot t_{pl}^2}; \quad c = \frac{L_{pl}}{t_{pl}}; \quad h = \frac{m_{pl} \cdot L_{pl}^2}{t_{pl}}, \quad (5)$$

причем, в противоположность выражению (2), без дополнительных численных констант. Добавляем к (5) $k_B = \frac{U_{pl}}{T_{pl}}$ и $h = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl}}$, где $U_{pl} = m_{pl} \cdot c^2$ – планковская энергия, а $\nu_{зд}$ – планковская частота, равная $\nu_{pl} = t_{pl}^{-1}$, и для закономерностей (1), (3) и (4) выходим на достаточно информативную форму их записи. Имеем математические выражения, за которыми, как и ранее:

— закон всемирного тяготения [16]

$$F_{пр} = F_{pl} \left(\frac{L_{pl}}{r}\right)^2 \frac{m_1 \cdot m_2}{m_{pl}^2}, \quad (6)$$

где F_{pl} – планковская сила, равная $F_{pl} = m_{pl} \frac{L_{pl}}{t_{pl}^2}$,

— формула Планка [17]

$$\frac{du_\varepsilon}{dv} = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl} \cdot \nu_{pl}} \left(\frac{\nu}{\nu_{pl}}\right)^3 \frac{1}{e^{T_{pl} \nu / \nu_{pl} T - 1}}; \quad (7)$$

— закон Стефана – Больцмана [17]

$$u_\varepsilon = \frac{U_\varepsilon}{V} = \frac{U_{pl}}{V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^4. \quad (8)$$

Мы видим, что физические законы (1), (3) и (4), открытые на основе результатов измерений как в солнечной системе, так и в земных условиях, справедливы и для явлений в космологическом масштабе. Для теории эволюции Вселенной значимость этого вывода велика.

Сравнив формулы (3) и (7), видим, что

$$h = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl}}. \quad (9)$$

Представленные в (6) – (8) безразмерные планковские величины силы притяжения $\frac{F_{пр}}{F_{pl}}$, массы $\frac{m}{m_{pl}}$, удаления между центрами масс материальных тел $\frac{r}{L_{pl}}$, объема $\frac{V}{V_{pl}}$, температуры $\frac{T}{T_{pl}}$, частоты $\frac{\nu}{\nu_{pl}}$, энергии $\frac{U}{U_{pl}}$ изменяется в своих естественных пределах.

Формулы (6) – (8) позволяют выделить следующие основные свойства Вселенной, которые она приобретает сразу же вслед за планковским мгновением времени t_{pl} :

- реализуется деление первичного материального тела с массой, которая равна планковской массе m_{pl} , на пары материальных точек, расположенные на определенных удалениях друг от друга;
- возникает гравитационное взаимодействие;
- также возникает электромагнитное поле, или, иными словами, возникают фотоны, которые являются частицами электромагнитного поля и носителями квантов (порций) энергии;
- фотонный газ занимает объем Вселенной и расширяется вместе с ней;
- количество первых зародившихся фотонов оказывается вполне достаточным, чтобы обеспечить непрерывный характер спектра их излучения как спектра излучения абсолютно черного тела;
- случайно оказавшиеся в тех или иных точках объема Вселенной продукты деления первичного материального тела в силу необходимости участвуют в гравитационном взаимодействии между собой. И что примечательно, наибольшие по величине силы притяжения $F_{пр}$ между удаленными друг от друга материальными точками наблюдаются именно вблизи начального (для дальнейшего расширения с охлаждением) планковского объема Вселенной.

Здесь по вопросу расширения изучаемой физической системы наблюдается согласие с модельным миром Фридмана, а размышление о делении начальной массы по причине радиоактивного распада нестабильных частиц (это в земных условиях сопровождается фотонным излучением), а также о понижении температуры по мере расширения Вселенной отвечает модели Леметра – Гамова. Новым для этой модели, пожалуй, является идея наличия гравитационного поля уже в весьма глубинном космологическом прошлом Вселенной, но данная мысль особо подчеркивается в общей теории относительности. Формулы (6) – (8) «приступают к работе» сразу же вслед за планковским мгновением времени $t_{pl} = 10^{-43}$ секунды, на которое объем V расширяющегося мира достигает размер конечной мизерной величины: $V_{pl} = L_{pl}^3 = 10^{-105} \text{ м}^3$. И эта расчетная величина не вступает в конфликт с решением, полученным А.А. Фридманом (1922 г.) при исследовании мировых уравнений А. Эйнштейна.

По свидетельству И. Стюарта [6, с. 12], Эйнштейн «определенно не сумел разглядеть...потенциальное следствие своей теории – Большой взрыв. Это предположение о том, что Вселенная возникла из одной точки в какой – то момент в отдаленном прошлом, около 13,8 миллиарда лет тому назад, по современным оценкам, в процессе, напоминающем гигантский взрыв...Эйнштейн сетовал на то, что мог бы предсказать это, если бы до конца верил своим уравнениям». Одним из решений теории гравитации Эйнштейна является модель пульсирующей Вселенной (модель «отскока» от сингулярности при $t = 0$), согласно которой наш цикл расширения является продолжением предыдущего цикла сжатия [2, с. 139 и др.].

При обсуждении вопроса рождения мира отмечается [там же] «возможность рассматривать, по крайней мере качественно, стадии эволюции Вселенной при $t = t_{pl}$ и даже ранее». По мнению авторов [там же, с. 153]: «Хорошую аналогию, позволяющую понять это явление, представляет процесс ядерного α - распада...После туннельного перехода α - частица вылетает из ядра...». Ниже, не затрагивая детали неизвестного нам механизма, посмотрим на возможный природный переход с позиции, скажем так, внешнего наблюдателя.

Принимаем модель «отскока» - и с целью выхода на (9) по пути, который отвечает направленности космологической стрелы времени, - предпринимаем попытку заглянуть «за край» реальности, охватить единым взглядом движение Вселенной в те весьма давние времена. Обращаясь к эпохе Планка (то есть к временам от $t = 0$ секунд до $t_{pl} = 10^{-43}$ секунды), считаем вполне допустимым говорить о физическом процессе как изменении в присутствии времени. Процесс протекает в (изолированном, окруженном космическим

вакуумом) сгустке материи, при его массе, скажем, равной m_{pl} . Первичный сгусток изначально заселен pl – квантами и обладает структурой, которая склонна к перестройке, что и реализуется. При $t = 0$ секунд все кванты практически неподвижны, их частота $\nu_{нач}$ близка нулю, температура $T_{нач}$ мира и его объем $V_{нач}$ близки нулю, а давление (равное энергии в единице объема) $p_{нач} = \frac{E_{нач}}{V_{нач}} = \frac{const}{V_{нач}}$ близко бесконечности. При «отскоке» от начальной позиции температура T , объем V , внутренняя энергия U , частота ν движения квантов возрастают, давление $p = \frac{U}{V}$ – снижается; вместе с тем, при $p > 0$ мы считаем справедливым принцип положительной работы: $pdV > 0$.

Известен двойной интеграл Планка [5]: $\iint dq \cdot dp$, где q – одна из независимых обобщенных координат физической системы, p – «соответствующий этой координате импульс (момент)». Ниже мы сохраняем принятые Планком обозначения координаты q и импульса p , не отказываясь от общепринятого обозначения давления через p , а также полагаем $\iint dq \cdot dp = \int dq \int dp$. Для простейшей из моделей эпохи Планка интеграл $\int dq = V_{pl} - V_{нач} = V_{pl} - 0 = V_{pl}$, а интеграл $\int dp = p_{pl} \cdot t_{pl} - p_{нач} \cdot t_{нач} = p_{pl} \cdot t_{pl} - p_{нач} \cdot 0 = \frac{U_{pl}}{V_{pl}} t_{pl}$. Двойной интеграл – в согласии с (9) – дает [18]

$$\iint dq \cdot dp = V_{pl} \frac{U_{pl}}{V_{pl}} t_{pl} = U_{pl} t_{pl} = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl}} = \left(\frac{h \cdot c^5}{G} \right)^{1/2} \left(\frac{h \cdot G}{c^5} \right)^{1/2} = h, \quad (10)$$

то есть решение, данное Планком [5]: $\iint dq \cdot dp = h$. Как видно, по своему физическому смыслу постоянная Планка h есть произведение объемной плотности планковской энергии на планковское пространство – время. Наблюдаемая сшивка встречных решений (7) и (10) в отношении позиции (9): $h = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl}}$ вряд ли является случайной.

Получить решение (10) методом общей теории относительности, которая, если следовать известному кубу Зельманова, является sG – теорией, не представляется возможным. С моделью Леметра – Гамова рассматриваемое описание сближает факт, что производство фотонов неразрывно связано с ходом термоядерных реакций.

В работе [19, с. 158 - 159] Вселенная рассматривается как сфера радиусом R и массой M , которая сосредоточена в центре сферы. Для галактики массой m масса инерционная принимается равной массе гравитационной, а сила инерции – равной силе притяжения. Закон всемирного тяготения и второй закон Ньютона позволяют выйти на формулу для объемной плотности массы гравитационной компоненты материи Вселенной: $\rho_g = \frac{M_g}{V} = \frac{3}{8\pi G_H t^2}$. При ином числовом значении константы эта же формула получена и в общей теории относительности, а с учетом (2) она принимает вид $\rho_g = \frac{M_g}{V} = \frac{m_{pl}}{L_{pl}^3} \left(\frac{t_{pl}}{t} \right)^2$. И если на планковский момент времени t_{pl} величина объемной плотности массы была космологически огромной (порядка $\rho_{gpl} = \frac{m_{pl}}{L_{pl}^3} = \frac{10^{-8}}{10^{-105}} = 10^{97}$ кг/м³), то к настоящему времени она стала заметно меньше единицы.

По А.А. Зельманову, «в основе космологии лежат сведения тройкого рода. Во – первых, это – эмпирические, главным образом, астрономические данные. Во – вторых, это законы физики, иначе говоря, основные физические теории. В – третьих, это философские принципы» [20, с. 321]. В литературе отмечается, что идея «горячего начала» Вселенной подтверждается как открытием реликтового излучения, так и согласием результатов расчета термоядерных реакций с данными наблюдательной астрономии. «Следует подчеркнуть, – отмечает Я.Б. Зельдович [21, с. 238], – что выводы о ядерных реакциях при $t = 1$ с и позже практически не зависят от предположений о более ранней стадии... процессы идут быстро... система забудет начальный состав, дальнейшее развитие событий не зависит от предположений о том, что было при $t < 1$ с». В «горячей» модели Вселенной для периода

ядерных реакций, с которым связывают рождение привычного для нас вещества, отводится время от 1 до 100...200 секунд от $t = 0$ [2, 19, 21]. Не исключено, что вполне реализуемый выход на элементарный квант действия $h = \frac{U_{pl}}{\nu_{pl}}$ (а также его физический смысл) служит свидетельством тому, что начало термоядерных реакций отвечает планковскому мгновению времени t_{pl} . Остатки начальной радиоактивности наблюдаются и на сегодняшний день.

В заключении вновь обратимся к закону Стефана – Больцмана (8). Известно простое мнемоническое правило [19, с. 81]: «чтобы найти характерную энергию фотона, просто умножьте температуру излучения на фундаментальную постоянную статистической механики, известную как постоянная Больцмана». При энергии единичного фотона $U_{\varepsilon}^{(1)} = k_B T$ из (8) следует формула для объемной концентрации фотонов: $n_{\varepsilon} = \frac{N_{\varepsilon}}{V} = \frac{1}{V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}} \right)^3$. В

записи вида $n_{\varepsilon} = 19,2\pi \left(\frac{k_B \cdot T}{c \cdot h} \right)^3$ эта формула получена в статистической физике [22, с. 19]. Скорее всего, вне планковской лаборатории как число фотонов N_{ε} в объеме Вселенной, как и сам объем V возрастают экспоненциально. По окончании процесса производства фотонов происходит смена режимов расширения Вселенной, причем количество фотонов сохраняется неизменным: $N_{\varepsilon} = const$. В данной связи выходим к уравнению адиабаты: $VT^3 = const$. А следовательно, и в современную эпоху по мере роста объема расширяющейся Вселенной температура заполняющего его фотонного газа понижается. По данным работы [23], закономерность $VT^3 = const$ учтена Г.А. Гамовым при теоретическом предсказании числового значения температуры остаточного фотонного излучения. Густая изначальная заселенность планковского сверхплотного сгустка материи первичными квантами (по оценкам в количестве около 10^{23} квантов), а также последовавший за эпохой Планка ограниченный по времени доминирующий хаос объясняют регистрируемую аппаратно высокую однородность и изотропию реликтового фотонного излучения.

1. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции / пер. с нем. М.: Эдиториал УРСС. 2001. – 228 с.
2. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд – во Моск. ун – та. 1988. – 199 с.
3. Об отрицательных величинах в физике [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.net/17_23943_ob-otritsatelnih-velichinah-v-fizike.html (дата обращения 10 июля 2021).
4. Торн К.С. Черные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна / пер. с англ. М.: ИФМЛ. 2020. – 616 с.
5. Планк М. Законы теплового излучения и гипотеза элементарного кванта действия // М. Планк. Избранные труды. М.: Наука. 1975. С. 282 – 310.
6. Стюарт И. Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную [Электронный ресурс]. URL: [Matematika_Vselennaya_Ien_Styart.pdf](#)-Abode Reder DC (дата обращения 17 августа 2021).
7. Вавилов С.И. Исаак Ньютон (1643 – 1727). М.: Наука. 1989. – 271 с.
8. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: Наука. 1971. – 939 с.
9. Вайнберг С. Космология / пер. с англ. М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013. – 608 с.
10. Тредер Г. – Ю. Взгляды Гельмгольца, Планка и Эйнштейна на единую физическую теорию // Проблемы физики: классика и современность / пер. с нем. и англ. М.: Мир. 1982. С. 295 – 314.
11. Планк М. О необратимых процессах излучения // М. Планк. Избранные труды. М.: Наука. 1975. С. 191 - 233.
12. Аракелян Г.Б. Фундаментальные безразмерные величины: Их роль и значение для методологии науки. Ереван: Изд – во АН АрмССР. 1981. – 160 с.
13. Естественные системы единиц [Электронный ресурс]. URL: ru.wikipedia.org/wiki/Естественные_системы_единиц (дата обращения 16 августа 2021).
14. Пеньков В.Е. Философские проблемы генезиса, структуры и содержания современной космологии: СПб.: Изд – во «Лань». 2021. – 192 с.
15. Бартон Ц. Начальный курс теории струн / пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС. 2011. – 784 с.
16. Кошман В.С. К вопросу оценки «трудового стажа» закона всемирного тяготения // Norwegian journal of development of international science. 2021. №69. Vol. 1. pp. 45 – 47.

17. Кошман В.С. Мир Фридмана, планковские величины и энергетическая модель эволюции Вселенной // *Sciences of Europe*. 2020. № 56. Vol. 1. pp. 17 – 20.
18. Кошман В.С. Обоснование необходимости переосмысления феномена «эпоха Планка» / *The scientific heritage*. 2021. №64. Vol. 1. pp. 11 – 14.
19. Вайнберг С. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной / пер. с англ. М.: Энергоиздат. 1981. – 208 с.
20. Зельманов А.А. Космология // *Развитие астрономии в СССР*. М.: Наука. 1967. С. 320 – 390.
21. Зельдович Я.Б. «Горячая» модель Вселенной // *Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная*. М.: Наука. С. 237 – 244 с.
22. Авакянц Л.П., Колесников С.В., Салецкий А.М. Введение в квантовую физику. Методика решения задач: учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ. 2018. – 400 с.
23. Чернин А.Д. Как Гамов вычислил температуру реликтового излучения, или немного об искусстве теоретической физики // *УФН*. 1994. Т. 164. №8. С. 889 – 896.

Онуфриенко В.В.

Распределение вакансий в матрице пирита на различных глубинах залеганий породы

*Красноярский государственный аграрный университет
(Россия, Красноярск)*

doi: 10.18411/trnio-11-2021-77

Аннотация

Для изучения влияния давления на распределение вакансий в кристаллической структуре проанализирован пирит на разных глубинах залегания (до 567 м в пределах одной скважины). Химический состав минерала определен методом EPMA на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU. Предложен метод расчета катионных и анионных вакансий в структуре пирита различного химического состава. Обнаружено, что катионные и анионные вакансии очень чувствительны к глубине залегания и, следовательно, к приложенному внешнему давлению. Показано, что с увеличением глубины линейная зависимость кривой «плотность вакансий - химический состав» смещается, а затем деформируется. На основе представленных исследований можно рекомендовать применение пирита в качестве гео - барометра.

Ключевые слова: атомы примеси, вакансии ионов, давление породы, глубина скважины, плотность вакансий.

Abstract

In order to study the effect of pressure on the crystal structure of minerals, the structure of pyrite was analyzed at different depths of its occurrence (up to 567 m) within one well. The chemical composition of the mineral was determined by the EPMA method on a VEGA II LMU scanning electron microscope. A method is proposed for calculating cationic and anionic vacancies in the structure of pyrite of various chemical compositions. It was found that cationic and anionic vacancies are highly sensitive to the depth of the mineral, and hence to the applied external pressure. It is shown that with increasing depth, the linear dependence of the "vacancy density - chemical composition" curve shifts and then deforms.

Keywords: the depths of occurrence, graphically, anionic and cationic vacancies.

Введение

Вакансии играют определяющую роль при переходе под воздействием внешнего давления пирротина из моноклинного в гексагональное кристаллической строение [1 - 4]. До настоящего времени остается во многом не изучено влияние давления на кристаллическую структуру пирита [5, 6].

Пирит содержит изоморфные примеси кобальта и никеля, а также меди, золота и, как правило, катионные и анионные вакансии [7-9]. Относительно высокая концентрация вакансий в структуре, несомненно, влияет на свойства пирита. Актуальность влияния давления на пирит обусловлена, в частности, и тем, что пирит – минерал, сопутствующий