

О. В. Михайлов**МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОДОРОД: 90 ЛЕТ БЕЗУСПЕШНЫХ ПОПЫТОК ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ**

Ключевые слова: металлический водород, высокое давление, синтез, молекулярная структура, квантово-химическое рассмотрение.

Хотя с момента публикации первой работы, посвященной металлическому водороду, прошло уже почти 100 лет, он так и не был получен в эксперименте, несмотря на все предпринятые за этот период усилия исследователей. Данное гипотетическое вещество упоминается уже в большом числе публикаций – как сугубо теоретических, так и связанных с экспериментальным его синтезом; при этом в каждом из этих работ особо подчеркивается то, что для его получения требуется наложение высоких давлений на «прекурсор», каковым является водород в твердом агрегатном состоянии. При этом, что весьма примечательно: год от года величина это самого давления, которое нужно наложить на твердый водород для его перехода в металлическое состояние, имеет отчетливо выраженную тенденцию к нарастанию: если в самой первой работе, посвященной этому уникальному веществу, считалось, что для его синтеза может вполне хватить давления 25 ГПа, то в настоящее время речь идет уже о необходимости наложения для этого давлений, на порядок превышающую эту величину – т.е. в сотни ГПа (и, соответственно, миллионы атмосфер). В связи с многочисленными неудачными попытками получить металлический водород есть все основания задаться простым вопросом, и именно – возможно ли вообще в принципе его существование, пусть даже результаты квантово-химических расчетов и допускают такую возможность. В настоящей статье как раз и обращено внимание на имеющиеся сомнения в возможности существования такого вещества.

O. V. Mikhailov**METALLIC HYDROGEN: 90 YEARS OF UNSUCCESSFUL ATTEMPTS TO OBTAIN IT**

Keywords: metallic hydrogen, high pressure, synthesis, molecular structure, quantum-chemical consideration.

Although almost 100 years have passed since the publication of the first work devoted to metallic hydrogen, it has still not been obtained experimentally, despite all the efforts of researchers during this period. This hypothetical substance has already been mentioned in a large number of publications - both purely theoretical and related to its experimental synthesis; and each of these works particularly emphasizes the fact that its production requires the application of high pressures to the "precursor", which is hydrogen in a solid state. Moreover, what is quite remarkable is that year after year, the value of the pressure that must be applied to solid hydrogen for its transition to a metallic state shows a clearly expressed tendency to increase: if in the very first work devoted to this unique substance, a pressure of 25 GPa was considered sufficient for its synthesis, now we are talking about the need to apply pressures an order of magnitude greater than this value - i.e. hundreds of GPa (and, accordingly, millions of atmospheres). Given the numerous failed attempts to produce metallic hydrogen, there's every reason to ask a simple question: is its existence even possible, even though quantum chemical calculations suggest it. This article addresses these doubts about the possibility of such a substance.

Введение

В 1935 г. американские физики Е. Wigner и Н. Huntington в работе [1] высказали весьма необычное для того времени предположение, что уже при относительно низких температурах и давлении свыше 25 ГПа (~250.000 атм) молекулярный водород может перейти в металлическое состояние. И с того самого момента получение такого вещества остается весьма актуальной проблемой современной неорганической и физической химии, а также физики высоких давлений. Повышенный интерес к нему обусловлен целым рядом факторов, причем как академического, так и практического свойства: ведь будь ТАКОЕ вещество получено и достаточно стабильно при нормальных и близких к ним условиях, оно вполне могло бы представить несомненный интерес уже хотя бы как весьма перспективное ракетное топливо. Дело в том, что при его сгорании, с одной стороны, выделяется огромное количество тепловой энергии, с другой стороны, единственным продуктом его горения является самая обыкновенная вода, и более чистого в экологическом отношении топлива нечего и желать. Уже поэтому попытки его получения в эксперименте предпринимались многократно и продолжают предпри-

ниматься и поныне, хотя только этим потенциал применения такого вещества отнюдь не исчерпывается (к слову, в той же работе [1] высказывалась мнение, что металлический водород будет способен выступать как сверхпроводник). В 2025 г. исполнилось ни много ни мало 90 лет с момента его первого упоминания в научной литературе, и на данный момент в литературе имеется довольно значительное количество работ, непосредственно связанных либо с попытками получения металлического водорода в эксперименте, либо с теоретическим прогнозированием его физико-химических свойств. В том или ином контексте это гипотетическое вещество упоминается уже в сотнях публикаций, и даже просто процитировать их полностью в данной статье не представляется возможным. Более того, проблеме «металлического водорода» посвящен ряд обзорных статей [2-12], причем диапазон времен их публикации растянут как минимум на 30 лет; последняя из них по хронологии датирована 2024 годом. Не вдаваясь здесь в подробности, изложенные в этих статьях, отметим главный вывод: для того, чтобы перевести водород в металлическое состояние, необходимо сжатие твердого молекулярного водорода под воздействием сверхвысоких

давлений. Однако, несмотря на все усилия исследователей, предпринятые для получения металлического водорода с использованием высоких давлений, до реального выделения его в изолированном состоянии в эксперименте дело так и не дошло. Но вот что примечательно: год от года величина это самого давления, которое нужно наложить на твердый водород для его перехода в металлическое состояние, имеет отчетливо выраженную тенденцию к нарастанию: если первоначально в [1] считалось, что для этого может вполне хватить 25 ГПа, то в настоящее время речь идет уже о необходимости наложения давлений, на порядок превышающую эту величину – т.е. в сотни ГПа (и, соответственно, миллионы атмосфер). Не исключено, что в недалеком будущем специалисты в области физики высоких давлений скажут, что для получения этого уникального вещества потребуются уже не миллионы, а десятки, сотни, и даже миллиарды атмосфер. Однако, прежде чем обсуждать реальность такого события вообще, сделаем одно небольшое отступление, которое, как нам кажется, позволит лучше понять наш методологический подход к решению указанной проблемы.

С древних времен известны три знаменитые математические задачи, а именно о делении угла на три равные части, о удвоении куба и о построения квадрата, площадь которого равна площади заданной окружности, с использованием только циркуля и линейки – классических инструментов античной геометрии. Но лишь в XX веке было строго доказано, что их нельзя решить, если пользоваться для этой цели только этими двумя инструментами. Далее, уже античные математики умели решать алгебраические квадратные уравнения; в средние века благодаря усилиям математиков удалось найти общие формулы решений для уравнений более высоких степеней – третьей и четвертой. Однако на протяжении столетий даже самые выдающиеся математики не смогли найти аналогичную формулу для алгебраических уравнений пятой степени, не говоря уже об уравнениях с еще большей степенью неизвестного. И неизвестно, сколь долго продолжались бы эти попытки, если бы в 1823 г. мало кому известный норвежский математик Нильс Хенрик Абель не доказал, что общей формулы решения уравнений пятой и более высоких степеней не существует, т.е. эту задачу и нельзя решить в принципе. «Прежде чем искать зависимость, сущность которой остается неизвестной, стоит задаться вопросом, возможна ли вообще такая зависимость», – писал он в одной из своих работ, посвященных этому вопросу. И как представляется автору данной статьи, аналогичный методологический подход должен быть задействован и для решения проблемы «металлического водорода».

Методологический подход

Согласно классическому определению, к металлам следует относить те и только те вещества, в которых реализуется металлическая связь; поэтому сначала следует понять, что эта связь собой представляет.

Прежде всего следует отметить, что подобная связь реализуется в первую очередь в твердом агрегатном состоянии (хотя некоторые авторы допускают возможность ее реализации и в жидкостях). Особенностью ее является то, что в случае ее реализации в узлах кристаллической решетки располагаются положительно заряженные ионы, между которыми беспорядочно, подобно молекулам газа, движутся т.н. электроны проводимости, образующиеся в результате их отрыва от атомов металлов. Именно они удерживают вместе положительно заряженные ионы; не будь их, такая кристаллическая решетка неизбежно распалась бы под действием сил кулоновского отталкивания между положительно заряженными ионами. В свою очередь, электроны удерживаются в пределах кристаллической решетки благодаря именно этим положительно заряженным ионам и не могут её покинуть, хотя и способны мигрировать между ними, создавая тем самым своего рода «электронный газ». Когда металл принимает какую-либо форму или растягивается, он не разрушается, потому что ионы в его кристаллической структуре довольно легко смещаются относительно друг друга [13,14]; при этом силы, связывающие компоненты такой решетки (т.е. ионы и электроны) в подобной структуре не локализованы и не направлены. Во многих случаях в металлах имеют место высокие координационные числа (например, 12), нехарактерные для кристаллических решеток с ковалентными связями. Все сказанное относится к твердому агрегатному состоянию, хотя, как уже указывалось выше, металлическая связь (а точнее, ее подобие) может сохраняться и в жидком агрегатном состоянии; при этом подвижными оказываются уже не только электроны, но и ионы, которые до перехода вещества в жидкость были жестко фиксированы в узлах кристаллической решетки. Простейшая схема металлической решетки представлена на Рис. 1.

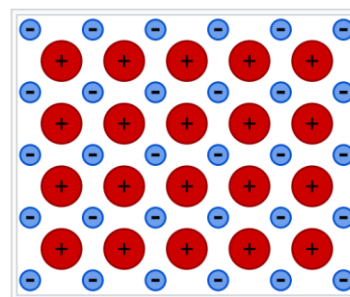


Рис. 1 - Схематическое изображение ионов и электронов в кристаллической решетке при реализации металлической связи.

Fig. 1 - Schematic representation of ions and electrons in a crystal lattice in a metallic bond

В отличие от химических соединений с ковалентными и ионными типами химической связи, в соединениях с металлической связью небольшое число электронов связывает большое число атомных ядер; таким образом, в металлах имеет место сильно делокализованная химическая связь. При этом, что важно, число валентных электронов в металлах всегда меньше числа атомных орбиталей (АО); в частности,

в простейшем из них – Li каждый атом лития предоставляет на связь четыре валентные орбитали – одну 2s- и три 2p-АО, но лишь один валентный электрон, вследствие чего электроны в металлах могут сравнительно легко мигрировать с одной АО на другую. Однако металлические связи – не единственный тип химической связи, который может иметь металл, даже в чистом виде; так, элементный галлий и элементная ртуть в кристаллической решетке также содержат ковалентно связанные пары атомов M_2 и ионы M_2^+ (M – металл) как в жидком, так и в твердом агрегатном состоянии. Учитывая все сказанное в данном параграфе, посмотрим теперь на атом водорода с позиций возможности образования им кристаллов с металлической связью.

Обсуждение результатов

Во-первых, атом водорода, в отличие от лития и тем более – от атомов других элементов-металлов имеет всего одну АО и один валентный электрон, т.е. здесь однозначно отсутствует превышение числа атомных орбиталей над числом валентных электронов, что **ОБЯЗАТЕЛЬНО** должно иметь место для реализации металлической связи. Таким образом, говорить о легком переходе электронов с одной АО на другую в данном случае не приходится; это в свою очередь означает, что одно из ключевых условий для образования металлической связи, указанное в предыдущем параграфе, для данного гипотетического вещества не выполняется.

Во-вторых, элементный водород даже в газовом агрегатном состоянии существует не в виде отдельных атомов, а в виде двухатомных молекул H_2 с весьма значительной энергией связи (436 кДж/моль) – это, кстати, одна из наиболее прочных ковалентных связей. При этом, что весьма важно, энергия ионизации атома водорода – 1311.3 кДж/моль, т.е. еще в три раза больше энергии связи H–H. С учетом всего этого для ионизации молекулярного водорода по валовой схеме $H_2 \rightarrow 2H^+$, как нетрудно подсчитать, потребуется свыше 3.000 кДж/моль, и трудно представить себе те силы, которые при наложении на твердый водород даже сверхвысоких давлений при тех температурах, что используются в эксперименте в земных условиях, смогли бы сначала разложить его молекулу на отдельные атомы, а потом еще и ионизировать каждый из образовавшихся атомов. Такое если и возможно, то лишь в недрах достаточно горячих звезд, но не в земных условиях.

В-третьих, ион водорода H^+ имеет одно очень существенное отличие от всех прочих ионов других элементов, а именно – исчезающе малый размер. Дело в том, что при удалении электрона от атома H остается не что иное, как его ядро, состоящее из одного протона, размер которого (т.н. электрический радиус) составляет 0.84 фм (в то время как радиус данного атома составляет 53 пм). Представить себе нахождение столь малых частиц в узлах кристаллической решетки, способных удерживать электроны, весьма трудно. Можно, конечно, предположить образование такой структуры, где в узлах кристаллической решетки находятся не протоны H^+ , а полиатомные частицы H_n^+ , в пространстве же между узлами –

свободные электроны. Однако даже такая структура не будет отвечать первому из указанных выше условий образования металлической связи, а именно превышению числа атомных орбиталей над числом валентных электронов; поскольку каждый атом водорода поставляет на образование химической связи лишь одну валентную АО 1s, то общее число орбиталей, на которых могут располагаться электроны, будет равно числу атомов n , но таковым же будет также общее число электронов, участвующих в образовании связей.

Подводя итоги сказанному, отметим: хотя и нельзя отрицать значимости тех многочисленных работ, которые касаются фазового состояния водорода при высоких давлениях – и экспериментальных, и теоретических, тем не менее, как представляется автору данной статьи, никто и никогда убедительно не доказал, что хотя бы одна из указанных в этих работах фаз является именно металлическим водородом. В связи с этим обращает на себя внимание довольно странная история, связанная с синтезом этого вещества. Речь идет о двух публикациях 2017 г. в высокоавторитетном журнале Science [15,16], в которых утверждалось об экспериментальном получении металлического водорода; хотя оно было отнюдь не первым, где декларировалось получение данного вещества, но вызвало большой ажиотаж, поскольку еще до публикации второй из этих статей [16], где рассказывалось об этом наблюдении, ее авторы решили показать полученный ими уникальный объект широкой публике. Как можно видеть из полученного ими фотоснимка, фрагмент которого представлен на Рис. 2, этот объект отчетливо проявляется в отраженном свете, причем отражает существенно больше, нежели окружающая его металлическая прокладка из металлического рения; на этом основании авторы [16] решили, что им удалось наконец-то получить металлический водород.



Рис. 2 - Фотография образца твердого водорода при давлении ~ 500 ГПа [16]. Размеры образца составляют ~8-10 μm , толщина ~1.2 μm . Стрелка указывает на объект, окруженный металлическим рением

Fig. 2 - Photograph of a solid hydrogen sample at a pressure of ~500 GPa [16]. The sample measures ~8–10 μm and is ~1.2 μm thick. The arrow points to the object surrounded by a metal ring

Но как только авторы этой самой статьи со своими коллегами собрались изолировать его из камеры, где он находился, одна из алмазных наковален, которые

использовались в их синтезе для наложения сверхвысоких давлений, рассыпалась на мельчайшие пылинки, а сам объект тут же исчез бесследно, и никто из присутствующих при этом свидетелей не смог его обнаружить. В принципе случившееся представляется вполне естественным: давление 500 ГПа, которое использовалось в том самом эксперименте, близко к пределу прочности алмаза, и при его снятии разрушение алмазных наковален – явление весьма распространенное. Как следствие, одна из них разрушилась полностью, а находившийся в камере твердый водород (независимо от того, была ли это металлическая или какая-либо другая фаза) трансформировался в то, что характерно для него при комнатной температуре и атмосферном давлении, т.е. в газообразное состояние. При этом других попыток показать «живьем» металлический водород, насколько известно автору данной статьи, более не предпринималось, да и сам эксперимент авторов [16] никто так до сих пор и не смог воспроизвести. Справедливости ради все же следует отметить, что шесть лет спустя после публикации работ [15,16] появилась еще одна статья [17], которую можно рассматривать как своего рода попытку повторить результаты, представленные в [16], поскольку в ней для получения МН использовалось фактически такое же давление, а именно 477–491 ГПа. Полученное ими изображение, приписываемое металлическому водороду (Рис. 3), весьма сходно с изображением, показанным на Рис. 2, однако и им не удалось изолировать это загадочное вещество из реакционной системы: при уменьшении нагрузки или давления полученный ими объект, по их мнению, перешел в молекулярную фазу.

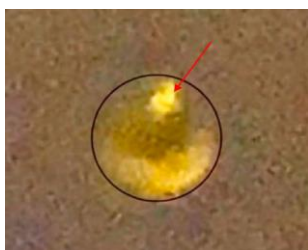


Рис. 3 - Фотография образца твердого водорода при давлении 477–491 ГПа [17]. Размеры образца составляют ~30 μm . Стрелка указывает на объект, окруженный металлическим рением

Fig. 3 - Photograph of a solid hydrogen sample at a pressure of 477–491 GPa [17]. The sample measures ~30 μm . The arrow points to the object surrounded by a metal ring

Несмотря на это, авторы [17] все же постулировали, что полученный ими объект не был метастабильным при нулевом давлении. Как бы то ни было, но после этого происшествия сомнения в возможности получения металлического водорода в эксперименте (которые, кстати, начали появляться как минимум уже полвека назад) не только не исчезли, а напротив, стали еще сильнее, что нашло свое отражение в появлении таких критических статей, как [18–22]. При этом сомнения, которые высказаны в этих работах, не связаны с теми моментами, что указаны выше, а с

другими, а именно со спецификой эксперимента (в частности, надежности определения используемого сверхвысокого давления и регистрации образовавшихся в ходе эксперимента веществ). И как представляется автору данной статьи, можно вполне согласиться с автором публикации [19] в том, что “*Healthy scepticism seems to be the wise position on the latest evidence for metallic hydrogen*” («Позиция, основанная на здоровом скептицизме, кажется разумной в отношении последних данных о наличии металлического водорода»)

P.S. Металлический водород еще не получен (и не факт, что это вообще когда-либо случится), однако его, как это не звучит парадоксально, кое-кто уже предлагает использовать в качестве прекурсора (!) в химических процессах. Речь идет о получении совершенно экзотических с точки зрения химии соединений состава CH_6 , C_2H_8 , C_3H_{10} , OH_3 , NH_4 , и CH_4OH , которые согласно авторам статьи [23] должны теоретически образовываться при взаимодействии металлического водорода с метаном, этаном, пропаном, водой, аммиаком и этанолом. Как бы то ни было, с точки зрения любого химика – как органика, так и неорганика все вышеперечисленные соединения являются полным абсурдом. Комментарии по этому поводу, однако, уже выходят за рамки данной статьи.

Литература

1. E. Wigner, H.B. Huntington. *J. Chem. Phys.* **3**, 12, 764–770 (1935). <https://doi.org/10.1063/1.1749590>.
2. H. Mao, R.J. Hemley. *Revs. Modern Phys.* **66**, 2, 671–692 (1994). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.66.671>.
3. E.G. Maksimov, Y.I. Shilov. *Phys.-Usp.* **42**, 11, 1121–1138 (1999).
4. W.J. Nellis. *Rep. Prog. Phys.* **69**, 5, 1479–1580 (2006). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/5/R05>.
5. R.F. Trunin, V.D. Uralin, A.B. Medvedev. *Phys.-Usp.* **53**, 6, 577–593 (2010). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201006d.0605>.
6. D.D. Klug, Y. Yao. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 38, 16999–17006 (2011). <https://doi.org/10.1039/C1CP21791G>.
7. J.M. McMahon, M.A. Morales, C. Pierleoni, D.M. Ceperley. *Rev. Mod. Phys.* **84**, 4, 1607–1653 (2012). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1607>.
8. W.J. Nellis. *High Press. Res.*, **33**, 2, 369–376 (2013). <https://doi.org/10.1080/08957959.2013.784907>.
9. A.F. Goncharov, R.T. Howie, E. Gregoryanz. *Low. Temp. Phys.* **39**, 5, 402–408 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4807051>.
10. A.N. Utyuzh, A.V. Mikhayenkov. *Phys.-Usp.*, **60**, 9, 886–901 (2017). <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.02.038077>.
11. R. Helled, G. Mazzola, R. Redmer. *Nature Revs. Phys.* **2**, 10, 562–574 (2020). <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0223-3>.
12. L. Wang, Z. Wu, G. Gao, Y. Tian. *Adv. Funct. Mater.* **34**, 48, 2411463 (2024). <https://doi.org/10.1002/adfm.202411463>.
13. Metallic bond. *Encyclopædia Britannica*. Дата обращения: 10 09 2025.
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Metallic_bonding. Дата обращения: 10 09 2025.
15. R.F. Service. *Science* **355** (6323), 332–333 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.355.6323.332>.
16. R.P. Dias, I.F. Silvera. *Science* **355** (6326), 715–718 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aal1579>.

17. W.C. Ferreira, M. Möller, K. Linsuain, J. Song, A. Salamat, R. Dias, I.F. Silvera. *APL Mater.* **11**, 12, 121116 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0178261>.
18. S. Azadi, T.D. Kühne. *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* **95**, 9, 449–453 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0021364012090020>.
19. P. Ball. *Nature Mater.* **16**, 3, 288–288 (2017). <https://doi.org/10.1038/nmat4872>.
20. X.-D. Liu, P. Dalladay-Simpson, R.T. Howie, B. Li, E. Gregoryanz. *Science*, **357** (6353), eaan2286 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aan2286>.
21. A.F. Goncharov, V.V. Struzhkin. *Science*, **357** (6353), eaam9736 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aam9736>.
22. D. Castelvichi. *Nature* **542** (7639), 17–17 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature.2017.21379>.
23. J. Seeyangnok, U. Pinsook, G.J. Ackland. *Nature Commun.*, **16**, 8548 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63552-6>.

References

1. E. Wigner, H.B. Huntington. *J. Chem. Phys.* **3**, 12, 764–770 (1935). <https://doi.org/10.1063/1.1749590>
2. H. Mao, R.J. Hemley. *Revs. Modern Phys.* **66**, 2, 671–692 (1994). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.66.671>.
3. E.G. Maksimov, Y.I. Shilov. *Phys.-Usp.* **42**, 11, 1121–1138 (1999).
4. W.J. Nellis. *Rep. Prog. Phys.* **69**, 5, 1479–1580 (2006). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/5/R05>
5. R.F. Trunin, V.D. Urlin, A.B. Medvedev. *Phys.-Usp.* **53**, 6, 577–593 (2010). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201006d.0605>
6. D.D. Klug, Y. Yao. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 38, 16999–17006 (2011). <https://doi.org/10.1039/C1CP21791G>.
7. J.M. McMahon, M.A. Morales, C. Pierleoni, D.M. Ceperley. *Rev. Mod. Phys.* **84**, 4, 1607–1653 (2012). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1607>
8. W.J. Nellis. *High Press. Res.*, **33**, 2, 369–376 (2013). <https://doi.org/10.1080/08957959.2013.784907>.
9. A.F. Goncharov, R.T. Howie, E. Gregoryanz. *Low. Temp. Phys.* **39**, 5, 402–408 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4807051>
10. A.N. Utyuzh, A.V. Mikheyenkov. *Phys.-Usp.*, **60**, 9, 886–901 (2017). <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.02.038077>.
11. R. Helled, G. Mazzola, R. Redmer. *Nature Revs. Phys.* **2**, 10, 562–574 (2020). <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0223-3>
12. L. Wang, Z. Wu, G. Gao, Y. Tian. *Adv. Funct. Mater.* **34**, 48, 2411463 (2024). <https://doi.org/10.1002/adfm.202411463>
13. Metallic bond. *Encyclopædia Britannica*. Date of access: 10 09 2025.
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Metallic_bonding. Date of access: 10 09 2025.
15. R.F. Service. *Science* **355** (6323), 332–333 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.355.6323.332>.
16. R.P. Dias, I.F. Silvera. *Science* **355** (6326), 715–718 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aal1579>.
17. W.C. Ferreira, M. Möller, K. Linsuain, J. Song, A. Salamat, R. Dias, I.F. Silvera. *APL Mater.* **11**, 12, 121116 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0178261>
18. S. Azadi, T.D. Kühne. *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* **95**, 9, 449–453 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0021364012090020>
19. P. Ball. *Nature Mater.* **16**, 3, 288–288 (2017). <https://doi.org/10.1038/nmat4872>
20. X.-D. Liu, P. Dalladay-Simpson, R.T. Howie, B. Li, E. Gregoryanz. *Science*, **357** (6353), eaan2286 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aan2286>
21. A.F. Goncharov, V.V. Struzhkin. *Science*, **357** (6353), eaam9736 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aam9736>
22. D. Castelvichi. *Nature* **542** (7639), 17–17 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature.2017.21379>.
23. J. Seeyangnok, U. Pinsook, G.J. Ackland. *Nature Commun.*, **16**, 8548 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63552-6>

© **О. В. Михайлов** – д.х.н., профессор кафедры Аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, ovm@kstu.ru.

© **O. V. Mikhailov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, ovm@kstu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.06.26.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.26.