

# Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 1 (101) январь–март 2019 года

## Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

## Учредитель

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Российский фонд фундаментальных исследований»**

Главный редактор В.Я. Панченко,  
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

## Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,  
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев,  
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, Д.Р. Хохлов

## Редакция:

Е.Б. Дубкова, И.А. Мосичева

## Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)





# Russian Foundation for Basic Research Journal

N 1 (101) January–March 2019

## **Founded in 1994**

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994  
(print) Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

## **The Founder Federal State Institution “Russian Foundation for Basic Research”**

Editor-in-Chief V. Panchenko,  
Deputy chief editors V. Kvardakov and V. Fridlyanov

### Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,  
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,  
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov, D. Khokhlov

### Editorial staff:

E. Dubkova, I. Mosicheva

### Editorial address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia  
Tel.: (499) 995-16-05  
e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)

## «Вестник РФФИ»

№ 1, 2019

Предисловие к тематическому выпуску .....	7
<i>В.Я. Панченко</i>	

## КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН, профессоре Н.Э. Нифантьеве ..	9
Аннотация к тематическому блоку.....	11
<i>Н.Э. Нифантьев</i>	

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК:  
ООН: 2019 – МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
ТАБЛИЦЫ

Периодический закон, Менделеевское общество и Менделеевские съезды .....	17
<i>А.Ю. Цивадзе</i>	
Периодическая таблица: икона и источник вдохновения .....	25
<i>М. Полякофф</i>	
Международный год Периодической таблицы химических элементов .....	39
<i>Н.П. Тарасова</i>	
Ведущая роль ЮНЕСКО в проведении Международного года Периодической таблицы химических элементов .....	43
<i>Н.А. Цивадзе</i>	
Российский вклад в Периодическую систему .....	54
<i>Е.А. Баум, В.В. Лунин</i>	
Звезды от колыбели до могилы – мощнейшие фабрики химических элементов .....	70
<i>А.А. Лутовинов</i>	
Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева .....	87
<i>Ю.Ц. Оганесян</i>	
Таблица Менделеева и морские биомолекулы .....	105
<i>В.А. Стоник, Т.Н. Макарьева</i>	
Аналитическая химия XXI века: новый облик науки .....	120
<i>Ю.А. Золотов</i>	

«RFBR Journal»  
Journal No 1, 2019

<b>Introductory Statement</b> .....	8
<i>V.Ya. Panchenko</i>	

THEMED ISSUE EDITOR'S COLUMN

<b>About the Editor of the Themed Section RAS Corresponding Member Professor N.E. Nifantev</b> ....	10
<b>Abstract of the Themed Section</b> .....	13
<i>N.E. Nifantev</i>	

THEMED SECTION:  
UN: 2019 – THE INTERNATIONAL YEAR OF THE PERIODIC TABLE  
(IYPT-2019)

<b>Periodic Law, Mendeleev Society and Mendeleev Congresses</b> .....	17
<i>A.Yu. Tsivadze</i>	
<b>The Periodic Table: Icon and Inspiration</b> .....	25
<i>M. Poliakoff</i>	
<b>International Year of the Periodic Table of Chemical Elements</b> .....	39
<i>N.P. Tarasova</i>	
<b>UNESCO Leading Role in the Celebration of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT-2019)</b> .....	43
<i>N.A. Tsivadze</i>	
<b>Russian Contribution to the Periodic System</b> .....	54
<i>E.A. Baum, V.V. Lunin</i>	
<b>Stars from Cradle to Grave: Powerful Factories of Chemical Elements</b> .....	70
<i>A.A. Lutovinov</i>	
<b>Synthesis and Study of the New Superheavy Elements of D.I. Mendeleev Periodic Table of the Elements</b> .....	87
<i>Yu.Ts. Oganessian</i>	
<b>Mendeleev's Periodic Table and Marine Biomolecules</b> .....	105
<i>V.A. Stonik, T.N. Makarieva</i>	
<b>Analytical Chemistry of the 21<sup>st</sup> Century: New Face of the Science</b> .....	120
<i>Yu.A. Zolotov</i>	

## Андрею Александровичу Фурсенко – 70!



Российский фонд фундаментальных исследований  
сердечно поздравляет помощника  
Президента Российской Федерации  
доктора физико-математических наук А.А. Фурсенко  
со славным юбилеем!

### *Дорогие читатели!*

2019 год отмечен исключительно важной для всей российской и мировой науки юбилейной датой – 150-летием открытия Периодического закона химических элементов великим русским ученым Д.И. Менделеевым. Этому событию посвящен Международный год Периодической таблицы химических элементов, который провозглашен ООН и отмечается в 2019 году под эгидой ЮНЕСКО и Международного Союза Теоретической и Прикладной Химии (IUPAC). Одним из ведущих мероприятий по чествованию юбилея станет XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Российского химического общества имени Д.И. Менделеева (РХО), который состоится в сентябре 2019 года в Санкт-Петербурге.

Редакция журнала «Вестник РФФИ» не случайно приняла решение посвятить два номера этому замечательному событию. Химия является одной из ключевых естественных наук, определяющей развитие многих смежных дисциплин, где нужны новые материалы, реагенты, молекулярные пробы и другие химические продукты и методики для специальных исследований.

Хочу отметить, что «химические науки» образуют крупный тематический блок исследований, активно поддерживаемый Российским фондом фундаментальных исследований. Только за последние пять лет на конкурсы фундаментальных работ по химии подано более 5 800 заявок, лучшие из которых получили поддержку около 2.7 млрд рублей. Значительные средства получили и химические ориентированные фундаментальные исследования (конкурс «офи») и междисциплинарные проекты (конкурс «мк»), на которые за эти же годы было выделено более 2.3 млрд рублей. Но этим не исчерпывается финансирование исследований по химии, которые также широко представлены в конкурсах региональных и международных программ.

Отдельно следует упомянуть поддержку Фондом молодых ученых. Мы смогли выстроить системный и полный подход привлечения молодежи и поддержки ее научных исследований. Приведу лишь один пример. Лауреат премии Президента РФ в области науки и инноваций для молодых ученых химик Максим Никитин в 2014 году получил от РФФИ поддержку по программе «Мой первый грант». В следующем 2015 году он стал грантополучателем Фонда по итогам конкурса инициативных молодежных проектов. Затем в 2017 году Максим Никитин получил грант по программе «Эврика! Идея», и в этом же году ему была вручена уже премия Президента. Таким образом, талантливый молодой химик смог при поддержке Фонда всего за три года вырасти в ученого, о котором узнала вся страна.

Увеличение общего бюджета РФФИ предусматривает и развитие форм и объемов поддержки фундаментальных химических исследований. Эксперты Фонда проводят оценку наиболее важных, «прорывных» направлений научных исследований. Здесь и поддержка так называемой «Зеленой химии», то есть усовершенствование процессов и реакций в химии, которые не только не вредят окружающей среде, но и в идеале оказывают на нее положительное воздействие на всех стадиях выполнения работ. Эти новые технологические схемы актуальны для крупнотоннажных химических производств, поэтому имеют ярко выраженное практическое применение. Немаловажно и то, что использование принципов Зеленой химии приводит к снижению затрат на производство. Ведь отсутствуют несколько крайне затратных, а также «грязных» стадий уничтожения или переработки вредных побочных продуктов.

Активное внимание РФФИ уделяет исследованиям в области полимерных материалов. Полимеры в наше время – важнейший класс современных материалов, которые широко используются во всех отраслях техники и технологии, а также в сельском хозяйстве и в быту.

Возможности современной химии предметно иллюстрируют статьи, включенные в эти два тематических номера журнала «Вестник РФФИ».

*Владислав Яковлевич Панченко  
председатель Совета Российского фонда  
фундаментальных исследований,  
главный редактор журнала «Вестник РФФИ»*

*Dear readers!*

The year of 2019 is marked by the jubilee data that is extremely important for all the world of science: the 150th anniversary of the Periodic Law of Chemical Elements discovered by Dmitry Mendeleev, the great Russian scientist. This year is named the International Year of Periodic Table of Chemical Elements by the UN and celebrated under the auspices of the UNESCO and International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry of the Mendeleev Russian Chemical Society (MRCS) to be held in September 2019 in St. Petersburg, Russia, will be one of the key events to celebrate the jubilee.

Therefore, it is not by coincidence that the Editorial Board of "Russian Foundation for Basic Research Journal" ("RFBR Journal") decided to devote two journal issues to this remarkable event. Chemistry is one of the natural science fields determining the development of many allied disciplines that need new materials, reagents, molecular probes, and other chemicals and procedures for special studies.

I would like to note that "chemical sciences" form a large topical block of scientific studies actively supported by the Russian Foundation for Basic Research. Only within the recent five years, more than 5,800 grant applications were filed, and the best of them were supported by about 2.7 billion rubles. In addition, considerable support was granted to the chemically oriented basic research ("of" contest) and interdisciplinary projects ("mk" contest), which received more than 2.3 billion rubles during the same years. Funding of researches in chemistry was also provided for the projects born in the frames of the regional and international programs.

The support of young scientists by the RFBR should be specially mentioned. We managed to frame the systematic and comprehensive approach to involve the young into science and to support their scientific activities. Let me mention just one example. Maxim Nikitin, chemist, the winner of the Russian Federation President Prize in Science and Innovations, was supported by the RFBR in 2014 under the "My first grant" program. In 2015, he received the RFBR grant under the contest of research projects carried out by the leading youth scientific teams. In 2017, Maxim Nikitin was awarded the RFBR grant under the "Eureka! Idea" program and the President Prize. Thus, being initially supported by the RFBR, the talented young chemist became the scientist famous in the whole country.

An increase in the overall budget of the RFBR also provides the development of forms and volumes for the support of fundamental chemical studies. The RFBR experts evaluate the most important, "break-through" fields of research. Among them there is the support of the so-called "green chemistry" studies, i.e., the improvement of processes and reactions in chemistry to make them environmentally friendly and, ideally, exert a positive effect on the Nature at all their stages. These innovative technological schemes are urgent for large-tonnage chemical productions and, hence, of pronounced practical use. It is also important that the use of green chemistry principles decreases production expenses due to the deletion of several very expensive and "dirty" stages of annihilation or processing of harmful by-products.

RFBR pays particular attention to studies in the field of polymer materials. Nowadays polymers compose the most important class of modern materials widely used in all areas of technology, as well as in agriculture and for private use.

Capabilities of the modern chemistry are clearly illustrated in the articles included into these two topical issues of "RFBR Journal".

*Vladislav Ya. Panchenko*  
*Chairman of the Board of the Russian Foundation for Basic Research,*  
*Editor-in-Chief of "RFBR Journal"*



## О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН, профессоре Н.Э. Нифантьеве



- *Заведующий лабораторией химии гликоконъюгатов Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН*
- *Член Бюро Отделения химии и наук о материалах РАН*
- *Заместитель председателя Научного совета РАН по органической химии и член других четырех Научных советов РАН*
- *Член редакционных коллегий журналов: Вестник Российской академии наук; Известия АН. Серия химическая; Биоорганическая химия; Journal of Carbohydrate Chemistry (США)*
- *Вице-президент (президент-элект) Отделения органической и биомолекулярной химии Международного союза теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), председатель подкомитета органического синтеза в этом Отделении ИЮПАК*
- *Контактный представитель РАН во Всемирном Совете Науки*
- *Лауреат премии им. М.М. Шемякина РАН (2013) и премии Ленинского комсомола в области науки и техники (1988)*
- *Head of the Laboratory of Glycoconjugate Chemistry N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry RAS*
- *Bureau member of the Division of Chemistry and Material Sciences of RAS*
- *Deputy-chair of RAS Scientific Council on Organic Chemistry, member of other four RAS Scientific Councils*
- *Member of editorial boards of journals: Herald of the Russian Academy of Sciences; Russian Chemical Bulletin; Bioorganic chemistry; Journal of Carbohydrate Chemistry (USA)*
- *Vice-President (President-elect) of the Division of Organic and Biomolecular Chemistry of the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), Chair of IUPAC "Organic Synthesis" Sub-committee*
- *RAS contact person in the International Science Council (ISC, former ICSU)*
- *RAS M. Shemyakin Prize (2013), Leninsky Komsomol Prize in Science and Technology (1988)*

Николай Эдуардович Нифантьев родился 12 октября 1958 г. в г. Красноярске. Окончил химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1980 г., после чего в том же году поступил в аспирантуру Института органической химии им. Н.Д. Зелинского АН СССР (в настоящее время – Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (ИОХ РАН)), в котором работает и поныне. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Органическая химия», а в 1995 году – докторскую диссертацию по специальности «Биоорганическая химия, химия природных и физиологически активных веществ».

В 1994 г. Н.Э. Нифантьев создал научную группу химии гликоконъюгатов в ИОХ РАН, которая к 2004 г. выросла в лабораторию химии гликоконъюгатов ИОХ РАН. Главные направления исследований этого коллектива посвящены синтезу, структурному и конформационному анализу олиго- и полисахаридов; изучению механизмов реакций гликозилирования; рациональному дизайном лекарственных соединений, а также разработке угле-

водных конъюгированных вакцин и диагностических тест-систем для обнаружения грибковых и бактериальных инфекций.

В 2011 году Н.Э. Нифантьев избран членом-корреспондентом РАН по Отделению химии и наук о материалах. Он является руководителем Комплексной программы полного цикла (КППЦ) «Конъюгированные углеводные вакцины» в рамках Стратегической Программы Исследований Технологической платформы «Медицина будущего».

Н.Э. Нифантьев является автором около 400 статей и обзоров в ведущих отечественных и международных журналах, а также имеет более 30 российских и зарубежных патентов на изобретения в области разработки лекарств и вакцин.

## About the Editor of the Themed Section RAS Corresponding Member, Professor N.E. Nifantiev

Nikolay Eduardovich Nifantiev was born on October 12, 1958, in Krasnoyarsk. In 1980, he received his B.Sc. in organic chemistry from the Department of Chemistry in Lomonosov Moscow State University and was enrolled in a postgraduate program in N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the USSR Academy of Sciences (IOC USSR AS). In 1984, he received his Ph.D. in organic chemistry from N.D. Zelinsky IOC USSR AS, and in 1995 he received his D.Sc. in bioorganic chemistry, and chemistry of natural and physiologically active compounds.

In 1994, N.E. Nifantiev founded the research group for chemistry of glycoconjugates, IOC RAS, which in 2004 grew into the laboratory of glycoconjugate chemistry. Current research focuses on the synthesis, structural and conformational analysis of oligo- and polysaccharides, investigation of mechanisms of glycosylation reactions, rational design of pharmaceutical preparations, the development of conjugated carbohydrate vaccines and

diagnostic test systems for detection of fungal and bacterial infections.

Since 2011 Professor N.E. Nifantiev is a Corresponding Member of the Division of Chemistry and Material Sciences of RAS. He is the Head of the Conjugated Carbohydrate Vaccines Integrative Program of Scientific Research (IPSR), which works within the Strategic Research Program of the Technological Platform “Medicine of the Future”.

Professor N.E. Nifantiev has published about 400 scientific papers and reviews in leading Russian and International journals, and he is the co-inventor in more than 30 Russian and foreign patents dedicated to the development of drugs and vaccines.

## Аннотация к тематическому блоку

*Н.Э. Нифантьев*

ООН провозгласила 2019 год Международным годом Периодической таблицы химических элементов (МГПТХЭ) – International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019). Ведущей организацией по его проведению является Организация Объединенных Наций в области науки, образования и культуры (ЮНЕСКО). Большую роль в продвижении 150-летия открытия Периодического закона химических элементов великим русским ученым Д.И. Менделеевым в качестве тематики Международного года ООН и в организации мероприятий МГПТХЭ сыграл Международный союз теоретической и прикладной химии (ИЮПАК). Одним из основных мероприятий по празднованию МГПТХЭ в России станет XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Российского химического общества имени Д.И. Менделеева (РХО), который состоится в сентябре 2019 года в Санкт-Петербурге.

Поэтому первый и второй выпуски журнала «Вестник Российского фонда фундаментальных исследований» в этом году посвящены этим двум очень важным для ученых-химиков событиям.

Готовя эти два специальных номера журнала, мы ставили перед собой задачу рассказать прежде всего о МГПТХЭ, РХО, а также о предстоящем и прошедших Менделеевских съездах. Все эти три темы рассмотрены в статье академика А.Ю. Цивадзе «Периодический закон, Менделеевское общество и Менделеевские съезды». История Русского химического общества началась в ноябре 1868 г., когда Министерство просвещения России утвердило устав РХО, одним из членом-учредителей которого был Д.И. Менделеев. В марте 1869 г. первое сообщение о Периодическом законе химических элементов Д.И. Менделеева было заслушано на

заседании РХО, поэтому именно 1869 г. мировое научное сообщество считает годом открытия Периодического закона и создания Периодической таблицы химических элементов.

РХО, претерпев на протяжении минувших лет ряд преобразований, в 1992 г. стало Российским химическим обществом имени Д.И. Менделеева. В 2019 г. РХО проводит юбилейные мероприятия, одним из которых станет внеочередной XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии в Санкт-Петербурге. Съезд соберет около 3 000 российских и иностранных участников, поэтому в его рамках запланировано проведение англоязычных международных симпозиумов, конференций и круглых столов по актуальным проблемам стратегического развития науки и техники.

О глобальной важности Периодического закона химических элементов для человечества рассказывает профессор Школы химии Университета Ноттингема М. Полякофф «Периодическая таблица: икона и источник вдохновения». С тех самых пор, как 1869 году были впервые опубликованы первые идеи Д.И. Менделеева о Периодической системе, Таблица по мере открытия новых элементов непрерывно расширялась, и теперь для современного химика она служит одновременно и своеобразной иконой, и источником вдохновения. Ее изображение сейчас настолько широко известно, что она признана во всем мире как один из символов науки. В представленной статье рассмотрены лишь некоторые из разнообразных форм Таблицы, например инфографическая, которая наглядно демонстрирует возможную «недостачу» ряда элементов и вдохновляет ученых на новые исследования.

В статье академика В.В. Лунина и к. х. н. Е.А. Баум «Российский вклад в Периодическую систему» также затронута история создания Периодической системы и рассказано о российском вкладе в Периодическую систему – об элементах, открытых в России. Созданием Периодической системы и формулировкой Периодического закона великий российский ученый Д.И. Менделеев положил конец 50-летнему поиску взаимосвязи между массой атомов и свойствами элементов. Последовавшие вскоре открытия предсказанных им химических элементов подтвердили фундаментальное значение его закона как основного закона естествознания. Работы ученых Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) по синтезу трансурановых и сверхтяжелых элементов с порядковыми номерами 113–118 на

границе Периодической таблицы, выполненные за последние 50 лет, являются бесспорным свидетельством правомерности закона периодичности химических элементов и торжества достижений российской науки.

Процесс организации МГПТХЭ и принятия соответствующего решения в ООН при поддержке ИЮПАК и многих национальных химических союзов рассмотрено в статье члена-корреспондента РАН Н.П. Тарасовой «Международный год Периодической таблицы химических элементов», а о роли ЮНЕСКО в проведении МГПТХЭ подробно говорится в статье сотрудницы Сектора естественных наук ЮНЕСКО к. ю. н. Н.А. Цивадзе «Ведущая роль ЮНЕСКО в проведении Международного года Периодической таблицы химических элементов».

Проведение Международного года Периодической таблицы химических элементов в 2019 году имеет принципиальное значение для всего мира. МГПТХЭ должен привлечь внимание мировой общественности к развитию фундаментальных наук, к углублению и расширению образования для устойчивого развития, к грандиозным проблемам современности, решить которые без активного использования достижений современной химии невозможно. Качество повседневной жизни нынешних и будущих поколений человечества напрямую связано с успехами и достижениями современной химической науки и технологии.

В 2019 г. как в России, так и во всем мире пройдут масштабные мероприятия, посвященные Д.И. Менделееву и его научному наследию. Международный год Периодической системы химических элементов еще раз подчеркивает важность системности в нашем хаотическом мире. Ведь именно система дает возможность понять саму идею закономерности, а значит, вооружает человечество способностью к предвидению.

В соответствии с резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН, ведущей организацией по проведению МГПТХЭ была определена ЮНЕСКО. На сегодняшний день ЮНЕСКО является крупнейшим специализированным учреждением ООН, обладающим широкой компетенцией по обеспечению сотрудничества государств по вопросам науки, способным играть уникальную роль в укреплении мира и устойчивого развития. Установлением памятных дат ООН стимулирует интерес к деятельности и программам организации в этих областях, а также содействует активизации деятельности на международном уровне. Провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической таблицы является признанием важной роли фундаментальных наук, в частности достижений в области химии и физики, в решении

стоящих перед современным миром многочисленных задач развития на пути осуществления принятой ООН «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». Международный год под эгидой ЮНЕСКО дает возможность мобилизовать все заинтересованные стороны вокруг темы «Наука за мир и развитие» – от государственных деятелей до представителей СМИ и учеников школ.

Хочу отметить, что мне не приходилось ранее читать статей об организации таких значимых международных мероприятий, поэтому статьи Н.П. Тарасовой и Н.А. Цивадзе представляются по-своему уникальными и информативными как для широкого читателя, так и для возможных будущих организаторов других «Международных годов» ООН.

Завершают первый тематический выпуск «Вестника РФФИ» статьи о достижениях современной химии. Об экспериментальной синтезе и изучении свойств новых сверхтяжелых элементов пишет академик Ю.Ц. Оганесян в статье «Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева».

В шестидесятые годы XX века была обоснована возможность существования области повышенной стабильности сверхтяжелых ядер в районе порядкового числа  $Z \approx 114$  и числа нейтронов  $N \approx 184$ . Впервые успешный синтез сверхтяжелых элементов был осуществлен в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В реакциях слияния ядер трансурановых элементов с ядрами кальция-48 были синтезированы сверхтяжелые элементы Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева с атомными номерами 114–118. В статье М.Ц. Оганесяна рассматриваются подходы к выбору реакций для синтеза новых элементов, методы изучения их ядерно-физических и химических свойств. Описывается создаваемый в ОИЯИ эксперимен-

тальный комплекс – «Фабрика сверхтяжелых элементов» и перспективы развития дальнейших исследований.

Статья профессора РАН А.А. Лутвинова «Звезды от колыбели до могилы – мощнейшие фабрики химических элементов» посвящена синтезу и превращениям химических элементов в космосе.

Первые элементы Периодической таблицы – водород, гелий и частично литий – появились в первые секунды после рождения Вселенной. Из них «собрались» первые звезды – естественные «фабрики» синтеза более тяжелых элементов не только на протяжении своей жизни, но и даже во время гибели, во время вспышек сверхновых. Вспышки сверхновых, в свою очередь, являются мощнейшими «фабриками» по производству тяжелых элементов. Современные инструменты позволяют не только регистрировать такие события, но и определять, сколько образовалось разных химических элементов во время таких событий. Недавнее открытие слияния нейтронных звезд и последующие исследования их послесвечения позволили установить процесс образования во Вселенной сверхтяжелых элементов вплоть до золота и урана. Таким образом, именно астрофизические наблюдения дают ученым важнейшую информацию о «темпах производства» элементов в природе, их обилию во Вселенной.

Академик В.А. Стоник и профессор Т.Н. Макарьева в статье «Таблица Менделеева и морские био-

молекулы» рассказывают о широком разнообразии химических элементов в структурах органических соединений, выделенных из морских источников.

В представленном мини-обзоре рассматривается включение ряда элементов таблицы Менделеева в морские природные соединения и их участие в жизнедеятельности морских организмов. Обсуждаются накопление морскими беспозвоночными отдельных металлов и образование комплексных соединений металлов с различными по химической структуре вторичными метаболитами. Кроме того, рассмотрены примеры образования ковалентных связей в биомолекулах морского происхождения с рядом неметаллов.

Академик Ю.А. Золотов в статье «Аналитическая химия XXI века: новый облик науки» охарактеризовал общее состояние аналитической химии, отмечая изменения в направлениях ее развития, существенный рост, с одной стороны, объема и сложности решаемых задач, а с другой – ее потенциала. Автор кратко рассмотрел положение аналитической химии в системе наук, отметил значительное увеличение ее инструментария. Основное внимание уделено достижениям российских специалистов в этой области, особенно тех, кто был поддержан Российским фондом фундаментальных исследований. Приведены примеры создания новых способов химического анализа, разработки оригинальных подходов к анализу и решению важных прикладных проблем в области медицины, охраны окружающей среды, контроля качества и безопасности пищевых продуктов и фармацевтических препаратов. В первом приближении оценены перспективы развития аналитической химии в течение ближайших 10–15 лет.

Авторы всех статей, собранных под обложкой этого выпуска «Вестника РФФИ», отдадут дань уважения великим открытиям ученых прошлого и настоящего и предвидят широкие перспективы развития исследований в области теоретической и прикладной химии в наступившем XXI веке.

## Abstract of the Themed Section

*N.E. Nifantiev*

United Nations Organization (UN) proclaimed the 2019 to be the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019). The leading organization on its implementation is the United Nations Educational, Scientific and Cultural Orga-

nization (UNESCO). The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) played a serious role in advancing the 150th anniversary of the discovery of the Periodic Law of chemical elements by great Russian scientist D.I. Mendeleev as the topic of the International Year of the UN and in organizing events dedicated to the IYPT2019. One of the main events on celebrating the

IYPT2019 in Russia will be the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry of the Mendeleev Russian Chemical Society (MRCS), which will be held in St. Petersburg in September 2019.

That is why, the first and second issues in the present year of the “Russian Foundation for Basic Research Journal” (“RFBR Journal”) are devoted to these events that are very important for chemist-researchers.

When preparing these two special issues of the Journal, we aimed at reporting on the IYPT2019, MRCS, and the forthcoming and previous Mendeleev Congresses. All the three topics are considered in the article “Periodic Law, Mendeleev Society and Mendeleev Congresses” written by Academician A. Yu. Tsivadze.

The history of the Russian Chemical Society (RCS) started in November 1868 when the Ministry of Enlightenment of Russia approved the Charter of the RCS, one of the Founding Members of which had been Dmitri Mendeleev. The first report on Mendeleev Periodic Table of Chemical Elements was delivered during a meeting of the RCS in March 1869. Therefore 1869 is considered by the world science as the year of discovery of the Periodic Law and formulation of the Periodic Table of Chemical Elements. Year 2019 is the 150th anniversary since Dmitry Mendeleev discovered the Periodic System, and the United Nations proclaimed this year to be the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements.

After a series of transformations, in 1992 the RCS became the Mendeleev Russian Chemical Society. In 2019, the RCS is holding anniversary events; the extraordinary Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry is one of them. It will be held in Saint Petersburg in September 2019 and will host approximately 3,000 foreign and Russian participants. English-speaking symposia, conferences and round tables on current issues of strategic development of science and technology are planned in the framework of the Congress.

Professor M. Poliakoff (School of Chemistry, University of Nottingham) told about the global significance of the Periodic Law of chemical elements for mankind in his report “The Periodic Table: Icon and Inspiration”. Since Dmitry Mendeleev published the initial concept of the Periodic Law in 1869, the table has been continuously updated with newly discovered elements, and figuratively speaking, today it serves both as an icon and as an inspiration for modern chemists. Its image is so easily recognizable all around the world that it has become a symbol for science. This paper highlights just a few of the varied forms that the Table can take, such as an infographic, which can convey the shortage of certain elements with great impact.

The article by Academician V.V. Lunin and PhD (Chemistry) E.A. Baum “Russian Contribution to the

Periodic System” also concerns the history of the Periodic Table creation and describes the Russian contribution to it: the elements discovered in Russia. For 50 years, scientists around the world have been searching for the relationship between the mass of atoms and the properties of elements, until the Russian scientist D.I. Mendeleev, having created the Periodic Table and formulated the Periodic Law, did complete this search. The discoveries of new chemical elements predicted by D.I. Mendeleev had soon followed and confirmed the fundamental importance of his Periodic Law as the basic law of natural sciences. The works on the synthesis of transuranium and superheavy elements with serial numbers 113–118 have been carried out by the scientists of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna, Russia) during the past 50 years, and are the indisputable evidence for the validity of the Law of Periodicity of Chemical Elements and the proof of the Russian science triumph.

The process of IYPT2019 organization and accepting the corresponding decision by the UN supported by the IUPAC and many national chemical unions is considered in the article “International Year of the Periodic Table of Chemical Elements” by RAS Corresponding Member N.P. Tarasova. The role of the UNESCO in performing the IYPT2019 is described in detail in the article written by PhD (Jurisprudence) N.A. Tsivadze (coworker of the Natural Science Sector of the UNESCO) “UNESCO Leading Role in the Celebration of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT 2019)”.

The International Year of the Periodic Table of Chemical Elements in 2019 is of basic significance for the entire world. The IYPT2019 draws the world community attention to the development of fundamental sciences, to deepening and expansion of education for sustainable development, to global problems that cannot be solved without active use of achievements of modern green chemistry. The quality of

everyday life of present and future generations is directly connected with the progress and achievements of chemical science and technology.

In 2019, the large-scale events dedicated to D.I. Mendeleev and his scientific heritage will take place both in Russia and throughout the world. The International Year of the Periodic Table once again emphasizes the importance of the systematicity in our chaotic world. The System gives an opportunity to understand the idea of regularity and thus arms human beings with the ability to predict.

In accordance with the United Nations General Assembly resolution, the year 2019 was proclaimed the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements, and the UNESCO was designated as the leading organization for its implementation. At the present day, the UNESCO is the largest UN specialized agency with broad competence in providing interstate collaboration in the area of science, capable of playing a unique role for promotion of peace and sustainable development. The establishment of UN observances stimulates interest in the activities and programs of the organization in these areas and also contributes to the intensification of activities at the international level. The proclamation of 2019 as the International Year of the Periodic Table is a recognition of the important role of the basic sciences, in particular, achievements in the field of chemistry and physics, in addressing the numerous development challenges that the world is currently facing in implementing the United Nations "2030 Agenda for Sustainable Development". The International Year under the auspices of UNESCO provides an opportunity to mobilize all interested parties around the topic of science for peace and development – from government officials to media representatives and schoolchildren.

I would like to note that had no chance to read previously any articles about the organization of such significant international events and, therefore,

the articles by N.P. Tarasova and N.A. Tsivadze seem to be unique and informative for both wide readership and possible future organizers of other "International Years" in the framework of the UN.

The first themed issue of the "RFBR Journal" is completed by the articles on achievements of the modern chemistry. Academician Yu.Ts. Oganessian writes about the experimental synthesis and study of the properties of new superheavy elements in the article "Synthesis and Study of the New Superheavy Elements of D.I. Mendeleev Periodic Table of Elements".

In the sixties of the XX century, the possibility of existence of the region of increased stability of superheavy nuclei in the vicinity of  $Z \approx 114$  and  $N \approx 184$  was proved. For the first time a successful synthesis of superheavy elements was carried out at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the JINR. Superheavy elements of D.I. Mendeleev Periodic Table of Elements with atomic numbers 114–118 were synthesized in the fusion reactions of the nuclei of the transuranic elements with calcium-48 nuclei.

The article by Yu.Ts. Oganessian deals with the choice of reactions for the synthesis of new elements, methods of studying their nuclear physical and chemical properties. The experimental complex "Factory of superheavy elements" founded at the JINR and prospects of further research development are described.

The article by Professor A.A. Lutovinov "Stars from Cradle to Grave: Powerful Factories of Chemical Elements" is devoted to the synthesis and transformations of chemical elements in the outer space.

The first elements of the Periodic Table – hydrogen, helium and partly lithium – appeared within the first seconds after the birth of the Universe. The first stars "gathered" from these materials are the natural factories of the synthesis of heavier elements not only throughout their lives, but even during their death process, during Supernova explosions. Supernova explosions, in their turn, are powerful factories for the production of heavy elements. Modern instruments allow scientists not only to register such events, but also to determine how many different chemical elements were formed during these events. The recent discovery of the merging neutron stars and subsequent studies of their afterglow allowed us to clarify the process of formation of superheavy elements in the Universe up to the gold and uranium. Thus, astrophysical observations give scientists the most important information about the "production rates" of elements in the nature and their abundance in the Universe.

Academician V.A. Stonik and Professor T.N. Makarieva in the article "Mendeleev's Periodic Table and Marine Biomolecules" tell about a wide variety of chemical elements in structures of organic compounds extracted from sea sources. This mini-review highlights the in-

volvement of some elements of Mendeleev Periodic Table into marine biogenic compounds and these elements participation in the metabolism of marine organisms. Accumulation of some metals by marine invertebrates and the metal complexation by highly structurally diverse secondary metabolites are discussed. In addition, examples of the covalent bonds formation in marine bioorganic molecules with a number of non-metals are considered.

Academician Yu.A. Zolotov in the article "Analytical Chemistry of the 21st Century: The New Face of the Science" characterizes the general state of analytical chemistry and marks changes in trends of its development, a substantial growth, on the one hand, of the volume of complexity of the solved problems and, on the other hand, of its potential. The position that the analytical chemistry occupies among other sciences is briefly considered, and its instrumentation improvement is noted.

Author focuses on the Russian scientists' advances in this sphere, particularly those whose investigation

were supported by the Russian Foundation for Basic Research. Examples of the new analytical methods creation, the original analytical approaches development and the important applied tasks solution in spheres of medicine, environmental protection and the food and medicines quality and safety control are given. The prospects of analytical chemistry development for the next 10–15 years are evaluated in the first approximation.

The authors of all articles of this issue of the "RFBR Journal", paying their respect to the great discoveries of scientists, past and present, forecast wide prospects of investigation development in the area of pure and applied chemistry in the XXI century.



## Периодический закон, Менделеевское общество и Менделеевские съезды

А.Ю. Цивадзе

В ноябре 1868 г. Министерство просвещения России утвердило устав Русского химического общества (РХО), одним из членов-учредителей которого был Д.И. Менделеев. В марте 1869 г. первое сообщение о Периодическом законе химических элементов Д.И. Менделеева было заслушано на заседании РХО, поэтому именно 1869 г. мировое научное сообщество считает годом открытия Периодического закона и создания Периодической таблицы химических элементов. В 2019 г. исполнилось 150 лет со дня публикации этой работы великого русского ученого, и ООН провозгласила этот год Международным годом Периодической таблицы химических элементов (International Year of the Periodic Table of Chemical Elements – IYPT2019).

РХО, претерпев на протяжении минувших лет ряд преобразований, в 1992 г. стало Российским химическим обществом имени Д.И. Менделеева. В 2019 г. РХО проводит юбилейные мероприятия, одним из которых станет внеочередной XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Предстоящий Менделеевский съезд состоится в сентябре 2019 г. в Санкт-Петербурге и соберет около 3 000 российских и иностранных участников, поэтому в его рамках запланировано проведение англоязычных международных симпозиумов, конференций и круглых столов по актуальным проблемам стратегического развития науки и техники.

**Ключевые слова:** Д.И. Менделеев, Периодический закон, Международный год Периодической таблицы химических элементов, Менделеевский съезд.

Периодический закон великого русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева является одним из самых значительных достижений не только химической, но и всей науки в целом. Периодическая таблица химических элементов является наиболее известной и узнаваемой среди всех других таблиц. По узнаваемости и универсальности Периодическую таблицу можно сравнивать разве только с таблицей умножения и азбукой. Однако Периодическая таблица отличается тем, что начиная с момента открытия постоянно расширяется и развивается, насыщается новыми элементами и научными данными, является источником вдохновения новых открытий и изобретений, а величие Д.И. Менделеева как автора Периодического закона и Периодической таблицы химических элементов со временем

только растет. Вместе с тем признание Периодического закона Д.И. Менделеева и периодической таблицы химических элементов проходило не быстро и не гладко. Поэтому история процесса признания открытия Д.И. Менделеева является предметом изучения, обсуждения и острых дискуссий. Такую перспективу уверенно предсказывал сам Д.И. Менделеев. По этому поводу он писал: «Периодическому закону – будущее разрушением не грозит, а только надстройки и развитие обещает» [1].

8 февраля 1869 г. Д.И. Менделееву исполнилось 35 лет. К этому времени, в день своего 35-летия, он еще не обнародовал свою формулировку Периодического закона, но, по-видимому, работа была уже подготовлена для представления. В настоящее время общеизвестно, что годом открытия Периодического закона считается 1869 год. В подтверждение этого решением Генеральной Ассамблеи Организации Объединенных Наций от 20 декабря 2017 г. 2019 год объявлен Международным годом Периодической таблицы химических элементов в связи со 150-летием открытия Д.И. Менделеевым Периодического закона. Если этот факт не вызывает никаких сомнений,



**ЦИВАДЗЕ**

**Аслан Юсупович**

академик, профессор,  
Президент Российского химического  
общества имени Д.И. Менделеева

то относительно конкретной даты открытия, когда именно впервые был предложен Периодический закон и представлена Периодическая таблица химических элементов, возникают споры и противоречивые рассуждения. В этом плане примечательна недавняя работа И.С. Дмитриева «Открытие периодического закона в интерпретации советских историков науки (1950–1980 гг.)», опубликованная в книге «История биологии и химии в XX столетии: вклад отечественных историков науки в изучении химико-биологических дисциплин» (Москва, 2018 г., с. 105–120) [2]. И.С. Дмитриев не без основания считает, что «среди наиболее обстоятельных историко-научных исследований в указанной области прежде всего следует назвать работы Бонифация Михайловича Кедрова (1903–1985) и в первую очередь его монографию "День одного великого открытия"» [3]. По версии Б.М. Кедрова, Периодический закон был открыт Д.И. Менделеевым 17 февраля 1869 г. По его мнению, к тому времени Д.И. Менделеев закончил три первые главы своей книги «Основы химии» [4] и напряженно думал над продолжением работы, в результате чего он составил черновой вариант центральной части таблицы и «открытие периодического закона вступило в решающую фазу» [3]. По версии Б.М. Кедрова, этот вариант таблицы Д.И. Менделеев отправил в типографию вечером 17 февраля. Кроме того, этот вариант таблицы был отпечатан на русском и французском языках – 150 и 50 экземпляров соответственно.

По мнению Д.Н. Трифонова [5], 17 февраля 1869 г. должен рассматриваться как «день завершения одного великого открытия», а не начало. Сопоставляя версии Б.Ф. Кедрова и Д.Н. Трифонова, И.С. Дмитриев выделяет три стадии процесса великого открытия:

- 1) начальная – от середины 15 февраля до утра 17 февраля;
- 2) определяющая – со второй половины дня 16 февраля до утра 17 февраля;
- 3) завершающая – вечер 17 февраля.

Несмотря на то, что указанные версии возникли в результате глубокого хроникально-событийного анализа, И.С. Дмитриев справедливо полагает, что в итоге процесс открытия был спрессован в один день, решающим событием оказалось озарение во время дневного сна, а в результате открытие представляется не как результат напряженной работы физико-химической мысли, а как следствие удачного размещения карточек, на которые вписаны атомные веса химических элементов. На самом деле к этому итогу Д.И. Менделеев шел достаточно долго и свой знаменитый учебник «Основы химии» задумал и построил на основе раздумий о Периодической системе [6].

В любом случае совершенно очевидно, что Д.И. Менделеев 17 февраля 1869 г. по старому стилю (1 марта по новому стилю) отпечатанную на отдельном листе статью «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве» передал Н.А. Меншуткину для публикации в «Журнале Русского химического общества» (РХО) и для сообщения на предстоящем заседании об открытии Периодического закона (рис. 1). Кроме того, после просмотра корректуры Д.И. Менделеев разослал статью многим отечественным и зарубежным химикам. Сообщение о Периодическом законе Д.И. Менделеева было заслушано на заседании РХО 6 марта 1869 г. Периодический закон Д.И. Менделеев сформулировал следующим образом: «Физические и химические свойства элементов, проявляющиеся в свойствах простых и сложных тел, ими образуемых, стоят в периодической зависимости от их атомного веса». Что же касается таблицы, то в феврале 1869 г. Д.И. Менделеев пред-

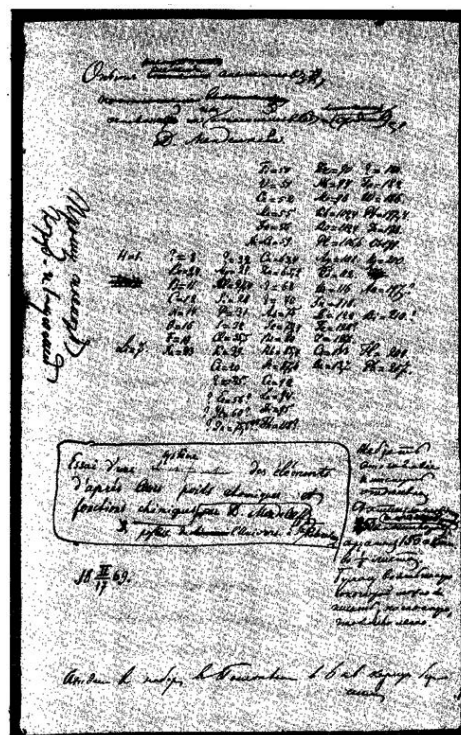


Рис. 1. Таблица из рукописи «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве», составленной и подписанной к печати 17 февраля (1 марта) 1869 г.

ставил так называемую «короткую форму» таблицы и только 3 декабря 1870 г. на заседании РХО представил «Естественную систему элементов», в наибольшей степени похожую на современную Периодическую таблицу химических элементов.

Хотя систематизацией свойств химических элементов занимались многие выдающиеся химики того времени, предложенный Д.И. Менделеевым Периодический закон его современники восприняли неоднозначно, а большинство отзывов отличалось недоверием и резкими возражениями. Тем не менее некоторые из предшественников Д.И. Менделеева находили определенные закономерности, отражающие подобие свойств химических элементов, расположенных последовательно в соответствующих рядах. Среди этих закономерностей следует выделить закон октав Дж. Ньюлендса (1865 г.), закон триад И. Дёберейнера (1829 г.) и правило А. Шанкуртуа (1862 г.) [6]. Однако эти закономерности носили частный характер и никак не приводили к обобщающему закону. Наиболее близко к открытию Д.И. Менделеева подошел известный немецкий ученый Лотар Мейер [7], который представил в 1870 г. подобие периодической таблицы, но он исходил из иных посылов, нежели Д.И. Менделеев. В частности, он писал: «Было бы поспешно изменять принятые атомные веса на основе столь непрочного исходного пункта» и далее: «То, что пока еще не разложенные химические элементы абсолютно неразложимы, в настоящее время представляется по меньшей мере весьма неправдоподобным». Однако позже некоторые из предшественников выступали с претензиями на приоритет открытия. Вместе с тем сам Л. Мейер признал приоритет Менделеева следующим отчетливым образом: «В 1869 году, раньше, чем я высказал свои мысли о периодичности свойств элементов, появился реферат статьи Менделеева, в котором записано: 1) при распо-

ложении элементов в порядке восходящих атомных весов наблюдается ступенчатое изменение свойств элементов; 2) величина атомных весов определяет свойства элементов; 3) атомные веса некоторых элементов требуют исправления; 4) должны существовать некоторые еще не открытые элементы... Это все было Менделеевым опубликовано до меня и вообще впервые. Я открыто сознаюсь, что у меня не хватило смелости для таких дальновидных предположений, какие с уверенностью высказал Менделеев». И действительно, понадобились великая научная смелость, настойчивость и уверенность Менделеева, чтобы химические элементы расположить в соответствии с Периодическим законом и выстроить такую таблицу, которые и отличали великого русского ученого от всех предшественников. Более того, Д.И. Менделеев настолько был уверен в периодичности изменений свойств элементов по предложенному им закону, что не искал надуманных объяснений в обнаруженных противоречиях. Он настойчиво и смело предсказывал свойства еще не открытых элементов, оставляя пустые ячейки в Периодической таблице, прогнозируя открытия соответствующих элементов. Удивительно, что в историческом аспекте его прогнозы довольно быстро полностью подтвердились. И эти исторические события ярко и отчетливо демонстрируют величие гениальности Д.И. Менделеева. Нельзя не отметить последующие исторические факты открытия предсказанных Д.И. Менделеевым новых элементов.

В первую очередь, обращает на себя внимание тот факт, что Периодический закон позволил Д.И. Менделееву, оперировавшему 63 известными тогда элементами, шаг за шагом исправить атомные веса 11 из них. Далее, уже в 1875 г. французский химик П. Лекок де Буабодран открыл галлий, который оказался предсказанным Д.И. Менделеевым «экаалюминием». Это поразило воображение даже известных скептиков. Более того, в 1879 г. Л. Нильсон открывает новый элемент скандий, который оказался предсказанным Дмитрием Ивановичем «экабором». В 1885 г. К. Винклер открывает новый элемент германий, который оказался предсказанным «экасилицием». Благодаря этим фактам Д.И. Менделеев предстал перед учеными каким-то волшебником, который, не имея в руках ни одной крупинки этих ранее неизвестных элементов, предсказывал удивительно точно их основные свойства. Даже тогда, когда Д.И. Менделеев обнаружил некоторые различия в свойствах предсказанного им «экаалюминия» с описанными П. Лекок де Буабодраном свойствами открытого им галлия, Дмитрий Иванович настоятельно доказывал свою правду. П. Лекок де Буабодран перепроверил свои экспериментальные данные и признал пра-

воту автора Периодического закона. Эти исторические факты явились торжеством прозорливости Д.И. Менделеева.

С открытием в 1890-х годах благородных газов были получены новые доказательства закона периодичности. Существование этих газов Д.И. Менделеев предсказал еще в 1869 г. Оставляя «пустые» ячейки между торием и ураном, Д.И. Менделеев способствовал открытию полония и радия Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри.

Благодаря последующим открытиям физиков Периодический закон получил квантово-механическое обоснование, и процесс открытия новых искусственных элементов продолжался. Элемент №101 получил название «менделевий» в честь великого русского ученого, а совсем недавно были открыты три новых элемента – 116-й, 117-й и 118-й. Элемент 118-й был открыт известным российским физиком академиком Ю.Ц. Оганесяном и назван «оганесоном» в честь автора открытия. 2019 год решением Генеральной Ассамблеи Организации Объединенных Наций от 20 декабря 2017 г. объявлен Международным годом Периодической таблицы химических элементов в связи с 150-летием открытия Д.И. Менделеевым Периодического закона. Решение было принято по инициативе Российского химического общества им. Д.И. Менделеева, поддержанной Российской академией наук, Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, Министерством иностранных дел Российской Федерации, ЮНЕСКО, ИЮПАК и другими международными и научными организациями и химическими обществами более 80 стран мира. 29 января 2019 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже состоялась церемония открытия Международного года. Эта церемония подтвердила абсолютное признание открытия гениального русского ученого Д.И. Менделеева как величайшего открытия в истории человечества. Одновременно церемония открытия в Париже продемонстрировала особое значение вклада российской науки в научно-технический прогресс.

Формирование Д.И. Менделеева как ученого начиналось и проходило в Санкт-Петербурге в то время, когда там одновременно возникла целая плеяда будущих выдающихся русских химиков. Среди них были: Н.А. Меншуткин, А.А. Воскресенский, А.П. Бородин, Н.Н. Зинин, А.Н. Бекетов, А.М. Бутлеров и другие. В сентябре 1860 г. в Карлсруэ состоялся первый международный конгресс химиков. Молодой Д.И. Менделеев в возрасте 26 лет принимал участие в работе этого важного конгресса. Наряду с Д.И. Менделеевым в работе конгресса принимали участие А.П. Бородин, Н.Н. Зинин и другие русские ученые.

Началось создание национальных химических обществ, и уже в 1863 г. Д.И. Менделеев писал: «Химические собрания наши бывают раз в две недели, они пополняются и думают выступить в свет, образовав общество...» Примечательно, что собрания проводили в квартирах ученых. Чаще всего собрания проводились в квартире Д.И. Менделеева.

4 января 1868 г. состоялся первый съезд русских естествоиспытателей и врачей. На съезде огласили заявление химиков: «Химическая секция заявила единодушное желание соединиться в Химическое общество для общения уже сложившихся сил русских химиков». Одновременно в различных странах Европы происходило образование национальных химических обществ. Лондонское химическое общество было образовано в 1841 г., а Французское химическое общество – в 1857 г. Несколько позже было образовано Немецкое химическое общество – в 1867 г, а еще позже Чешское химическое общество (1870 г.). Американское химическое общество было образовано в 1876 г. С учетом этих событий вопрос образования в России национального химического общества в шестидесятые годы девятнадцатого столетия стало весьма актуальным, и Д.И. Менделеев явился одним из наиболее активных инициаторов процесса организации Русского химического общества. Был подготовлен проект устава Русского химического общества. Сохранился рукописный вариант проекта устава, собственноручно написанный Д.И. Менделеевым (рис. 2). Устав был официально утвержден Министерством народного просвещения России 28 октября 1868 года почти без изменений.

В 1876 г. по предложению Д.И. Менделеева Русское химическое общество было преобразовано в Русское физико-химическое общество путем присоединения к нему Русского физического общества. На заседаниях Русского химического общества и отделения химии Рус-

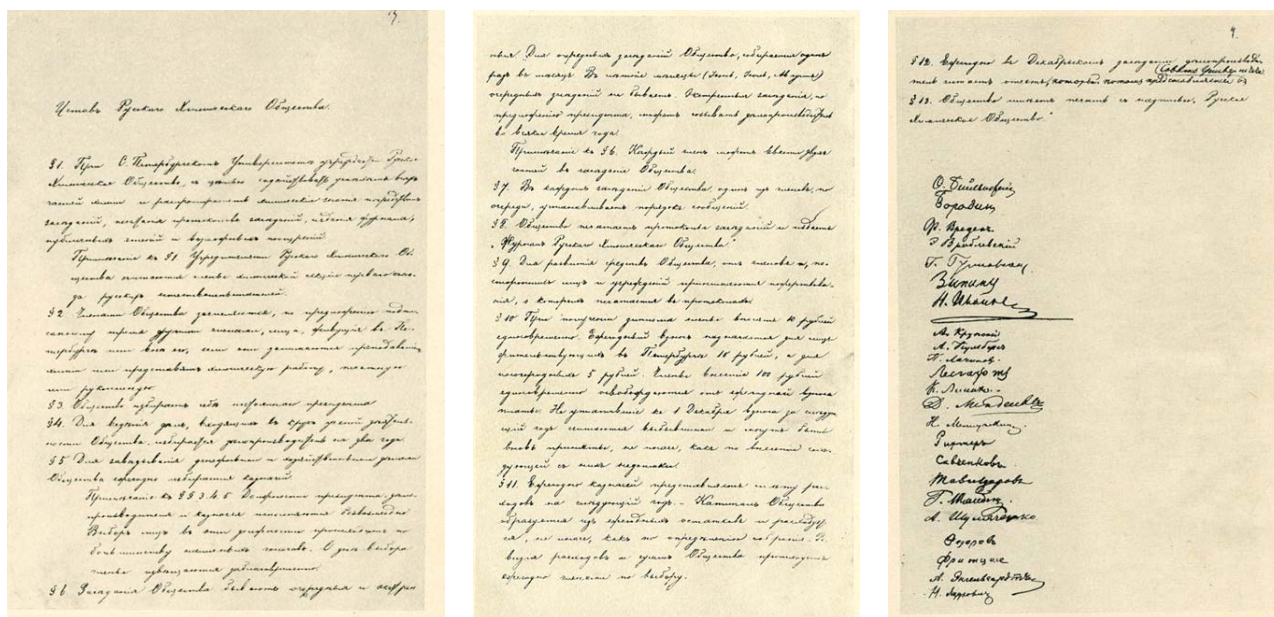


Рис. 2. Проект Устава Русского химического общества, собственноручно написанный Д.И. Менделеевым и почти без изменений официально утвержденный Министерством народного просвещения 28 октября 1868 года.

ского физико-химического общества с 1868 по 1897 г. Д.И. Менделеев сделал 90 докладов. На заседаниях Физического общества и отделения физики РФХО за период с 1872 по 1887 г. Д.И. Менделеев выступил 35 раз с ключевыми докладами. В журнале общества было напечатано свыше 150 оригинальных сообщений Д.И. Менделеева.

Сообщение Д.И. Менделеева о Периодической системе химических элементов на заседании Русского химического общества под названием «Соотношение свойств с атомным весом элементов» было заслушано 6 марта 1869 г. Вот почему 1869 г. является годом создания Периодической таблицы химических элементов и годом открытия Периодического закона.

В 1931 г. на базе Русского физико-химического общества было образовано Всесоюзное химическое общество им. Д.И. Менделеева. В 1992 г. на базе Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева было образовано Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева. Следовательно, Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева является правопреемником Русского химического общества и поэтому

в 2018 г. отмечали 150-летие Российского химического общества.

22 января 2018 г. состоялось совместное расширенное заседание президиума Российского химического общества им. Д.И. Менделеева и бюро отделения химии и наук о материалах Российской академии наук (ОХНМ РАН), в работе которого наряду с членами президиума РХО и бюро ОХНМ РАН приняли участие Министр науки и высшего образования России М.М. Котюков и его первый заместитель академик Г.В. Трубников. С докладами выступили: президент РХО им. Д.И. Менделеева академик А.Ю. Цивадзе, паст-президент ИЮПАК член-корреспондент РАН Н.П. Тарасова и вице-президент РХО им. Д.И. Менделеева член-корреспондент РАН Ю.Г. Горбунова. На заседании обсуждались вопросы, связанные с решением Генеральной Ассамблеи ООН провозгласить 2019 год Международным годом Периодической таблицы элементов. Было принято решение на 2018 год запланировать мероприятия, посвященные 150-летию РХО, а в 2019 г. провести юбилейные мероприятия, посвященные 150-летию Периодической таблицы химических элементов. План предусматривал проведение большого числа мероприятий, и можно отметить, что намеченный план успешно выполняется. Одним из основных мероприятий международного юбилейного года будет внеочередной XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, проведение которого планируется с 9 по 13 сентября 2019 года в Санкт-Петербурге. В его работе примут участие около 3 000 участников, в том числе более 300 иностранных. Одной из особенностей

предстоящего Менделеевского съезда будет значительное увеличение доли иностранных участников этого известного и значительного национального форума химиков России. Наряду с традиционными пленарными и секционными заседаниями в рамках съезда запланировано проведение 10 англоязычных международных конференций, симпозиумов и 12 круглых столов по актуальным проблемам стратегического развития науки и техники.

Менделеевские съезды всегда отличались междисциплинарностью с широким интегральным охватом актуальных проблем как фундаментальной, так и прикладной науки, а также представительностью участников. В настоящее время такие масштабные форумы особенно востребованы в связи с новыми вызовами, возникающими перед человечеством.

Менделеевские съезды проводятся с интервалом 4-5 лет в основных научных и культурных центрах нашей страны и определяют главные направления развития химической науки и промышленности. Научная программа предстоящего XXI съезда предусматривает проведение пяти пленарных заседаний, на которых будут заслушаны 20 пленарных докладов ведущих ученых мира, в том числе Нобелевских лауреатов. На съезде также будут работать 10 секций по приоритетным направлениям развития фундаментальной химической науки и технологии, материаловедения,

рационального использования природных ресурсов, противодействия техногенным вызовам, переработки промышленных и сельскохозяйственных отходов, экологии, образования и др. На заседаниях 10 международных англоязычных симпозиумов будут обсуждаться актуальные проблемы конкретных тематически приоритетных направлений. На заседаниях круглых столов будут проводиться дискуссии по злободневным вопросам взаимодействия науки и бизнеса. Предусмотрены дискуссии по вопросам истории химии и проблемам научной дипломатии. Нет сомнения в том, что успешное проведение XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии будет способствовать научно-техническому прогрессу во всем мире.

Благодарю Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку в организации и проведении Менделеевских съездов в Москве (2007 г.), Волгограде (2011 г.) и Екатеринбурге (2016 г.).

## Литература

1. Д.И. Менделеев  
Архив Д.И. Менделеева, Т. 1, Автобиографические материалы: Сборник документов, под общ. ред. С.А. Щукарева, С.Н. Валка, СССР, Ленинград, ЛГУ, 1951, 208 с.
2. И.С. Дмитриев  
В Истории биологии и химии в XX столетии: вклад отечественных историков науки в изучение химико-биологических дисциплин, РФ, Москва, Янус-К, 2018, с. 105-120.
3. Б.М. Кедров  
День одного великого открытия: Сборник, Сер.: Философы России XX века, РФ, Москва, УРСС, 2001, 640 с.
4. Д.И. Менделеев  
Основы химии, в 2 тт., СССР, Москва – Ленинград, Госиздат, 1927.
5. Р.Б. Добротин, Н.Г. Кадрило, Л.С. Керова, Д.Н. Трифионов  
Летопись жизни и деятельности Д.И. Менделеева, СССР, Ленинград, Наука, 1984, 532 с.
6. Д.И. Менделеев. 150 лет со дня рождения (1834–1984), под ред. Н.М. Жаворонкова, А.Ю. Цивадзе, СССР, Москва, Наука, 1986, 248 с.
7. L. Meyer  
*Die Natur der Chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte*, Norddeutscher Bund, Leipzig und Heidelberg, C.F. Winter'sche Verlagsbuchhandlung, 1868, 390 S.
8. XII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: пленарные доклады (Баку, 21-25 сентября 1981 г.), под ред. Н.М. Жаворонкова, А.Ю. Цивадзе, СССР, Москва, Наука, 1984, 268 с.

## English

# Periodic Law, Mendeleev Society and Mendeleev Congresses

**Aslan Yu. Tsivadze**  
Academician, Professor  
President of Mendeleev Russian Chemical Society  
8/1, Lefortovskiy Lane, Moscow, 105005, Russia  
es.mcsr@gmail.com

## Abstract

In November 1868, the Ministry of Enlightenment of Russia approved the Charter of the Russian Chemical Society (RCS), one of the Founding Members of which had been Dmitri Mendeleev. The first report on Mendeleev Periodic Table of Chemical

Elements was delivered during a meeting of the RCS in March 1869. Therefore 1869 is considered by the world science as the year of discovery of the Periodic Law and formulation of the Periodic Table of Chemical Elements. Year 2019 is the 150th anniversary since Dmitry Mendeleev discovered the Periodic System, and the United Nations proclaimed this year to be the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019).

After a series of transformations, in 1992 the RCS became the Mendeleev Russian Chemical Society. In 2019, the RCS is holding anniversary events. The extraordinary Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry is one of them. It will be held in Saint Petersburg in September 2019 and will host approximately 3,000 foreign and Russian participants. English-speaking symposia, conferences and round tables on current issues of strategic development of science and technology are planned as a part of the Congress.

**Keywords:** Dmitri Mendeleev, Periodic Law, International Year of the Periodic Table of Chemical Elements, Mendeleev Congress.

## Images & Tables

The image shows a handwritten manuscript page with a table of elements. The table has several columns, likely representing atomic weight, chemical symbol, and name. The handwriting is in Russian. There are also some handwritten notes and a signature on the page.

Fig. 1. The table from the manuscript “An experiment on a system of elements based on their atomic weights and chemical similarities” accepted for publication in February 17 (March 1), 1869.

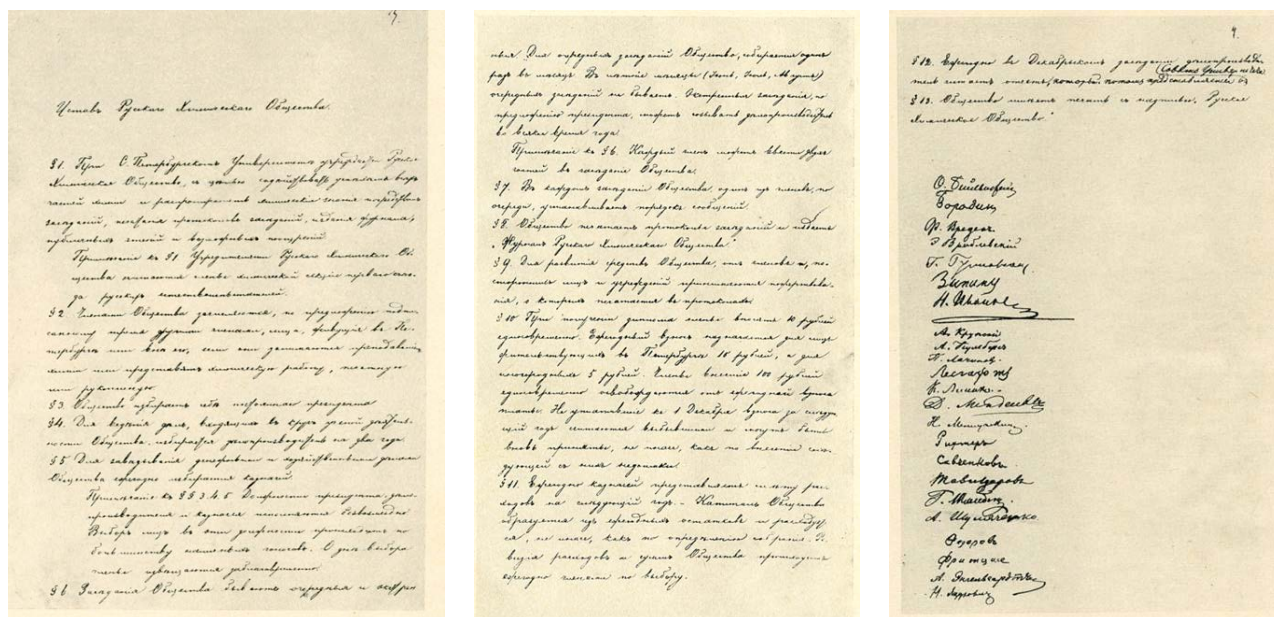


Fig. 2. The draft Statute of Russian Physical Chemical Society hand-written by Dmitri Mendeleev and approved by the Ministry of Public Education with minor changes in October 28, 1868.

## References

1. **D.I. Mendeleev**  
*D.I. Mendeleev's Archive, Vol. 1, Autobiographical Materials: Compilation of Documents [Arkhiv D.I. Mendeleyeva, T. 1, Avtobiograficheskie materialy: Sbornik dokumentov]*, Eds. S.A. Schukarev, S.N. Valk, USSR, Leningrad, Leningrad State University Publ., 1951, 208 pp. (in Russian).
2. **I.S. Dmitriev**  
*In The History of Biology and Chemistry in the XX Century: the Contribution of Russian Historians of Science in the Study of Chemical and Biological Disciplines [Istoriya biologii i khimii v XX stoletii: vklad otechestvennykh istorikov nauki v izuchenie khimiko-biologicheskikh distsiplin]*, RF, Moscow, Janus-K Publ., 2018, pp. 105-120 (in Russian).
3. **B.M. Kedrov**  
*Day of One Great Discovery: Compilation, Ser.: Philosophers of Russia of the Twentieth Century [Den odnogo velikogo otkrytiya: Sbornik, Ser.: Filosofy Rossii XX veka]*, RF, Moscow, URSS Publ., 2001, 640 pp. (in Russian).
4. **D.I. Mendeleev**  
*Fundamentals of Chemistry [Osnovy khimii]*, in 2 Vols, USSR, Moscow – Leningrad, Gosizdat Publ., 1927, (in Russian).
5. **R.B. Dobrotin, N.G. Kadrilo, L.S. Kerova, D.N. Trifonov**  
*D.I. Mendeleev's Life and Work Chronicle [Letopis zhizni i deyatelnosti D.I. Mendeleyeva]*, USSR, Leningrad, Nauka Publ., 1984, 532 pp. (in Russian).
6. **D.I. Mendeleev. The 150<sup>th</sup> Anniversary (1834-1984) [D.I. Mendeleev. 150 let so dnya rozhdeniya (1834-1984)]**, Eds N.M. Zhavoronkov, A.Yu. Tsivadze, USSR, Moscow, Science, 1986, 248 pp. (in Russian).
7. **L. Meyer**  
*Die Natur der Chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte*, Norddeutscher Bund, Leipzig und Heidelberg, C.F. Winter'sche Verlagsbuchhandlung, 1868, 390 S.
8. **XII Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: Plenary Reports (Baku, September 21-25, 1981) [XII Mendeleyevsky sezd po obshchey i prikladnoy khimii: plenarnye doklady (Baku, 21-25 sentyabrya 1981 g.)]**, Ed. N.M. Zhavoronkov, A.Yu. Tsivadze, USSR, Moscow, Science, 1984, 268 pp. (in Russian).



## Периодическая таблица: икона и источник вдохновения

М. Полякофф

С тех самых пор, как в 1869 году были впервые опубликованы первые идеи Д.И. Менделеева о Периодической системе, таблица по мере открытия новых элементов непрерывно расширялась, и теперь для современного химика она служит одновременно и своеобразной иконой, и источником вдохновения. Ее изображение сейчас настолько широко известно, что она признана во всем мире как один из символов науки. В настоящей статье рассмотрены лишь некоторые из разнообразных форм таблицы, например инфографическая, которая наглядно демонстрирует возможную «недостачу» ряда элементов.

**Ключевые слова:** Периодический закон, Таблица Д.И. Менделеева, химический элемент.

Я глубоко признателен академику В.Я. Панченко и члену-корреспонденту РАН Н.Э. Нифантьеву за приглашение написать статью для этого специального выпуска Вестника РФФИ, посвященного Международному году Периодической таблицы химических элементов, который проводится в 2019 году под эгидой Организации Объединенных Наций, а также предстоящему XXI Менделеевскому съезду по общей и прикладной химии (9–13 сентября 2019 г., Санкт-Петербург). К сожалению, не во всех странах Периодическая таблица химических элементов носит имя Д.И. Менделеева, хотя этой таблицей пользуются во всем мире.

Моя первая Периодическая таблица [1] показана на *рисунке 1*. Довольно забавно, что в моем первом учебнике по неорганической химии [2] вообще не было Периодической таблицы. Как и многие из моих современников, я купил плакат, который гордо повесил на стену своей спальни и до сих пор храню в своем кабинете вот уже более пятидесяти лет.

Я проработал много лет химиком-неоргаником и по сей день продолжаю преподавать этот предмет, но в фокусе моей исследовательской

деятельности находится «зеленая химия», направленная на разработку экологически чистых и рациональных путей производства химических реагентов и материалов [3, 4]. Большая часть текущих исследований в этой области направлена на поиск альтернативного нефтяному сырью ресурса для получения органических соединений (см. например [5]), но мы часто упускаем из виду тот факт, что человечество может столкнуться с дефицитом многих химических элементов как таковых. В отличие от нефти, элементы не могут исчерпаться, потому что, кроме гелия, который может улететь в космос, и урана, который расщепляется, элементы по существу неразрушимы. Однако человеческая деятельность может постепенно снижать доступность отдельных элементов. Действительно, добывая их из относительно богатых залежей и включая элементы в состав различных продуктов, мы невольно перераспределяем элементы, «размазывая» их настолько тонко по всей планете, что их не так-то легко будет добыть в будущем.

На возможный дефицит элементов недавно указал Майк Питтс (UK's Chemistry Innovation Knowledge Transfer Network – Британская сеть передачи инноваций в области химии), создавший одну из первых Периодических таблиц химических элементов, находящихся «под угрозой исчезновения». Новая версия этой таблицы (*рис. 2*) недавно подготовлена Дэвидом Коул-Гамильтоном и его коллегами по Европейскому химическому обществу и специально приурочена к Международному году Периодической таблицы химических элементов [6]. Это довольно впечатляющая таблица. Большинство



### ПОЛЯКОФФ

#### Мартин

член Лондонского Королевского Общества,  
профессор химии,  
Школа химии, Ноттингемский университет

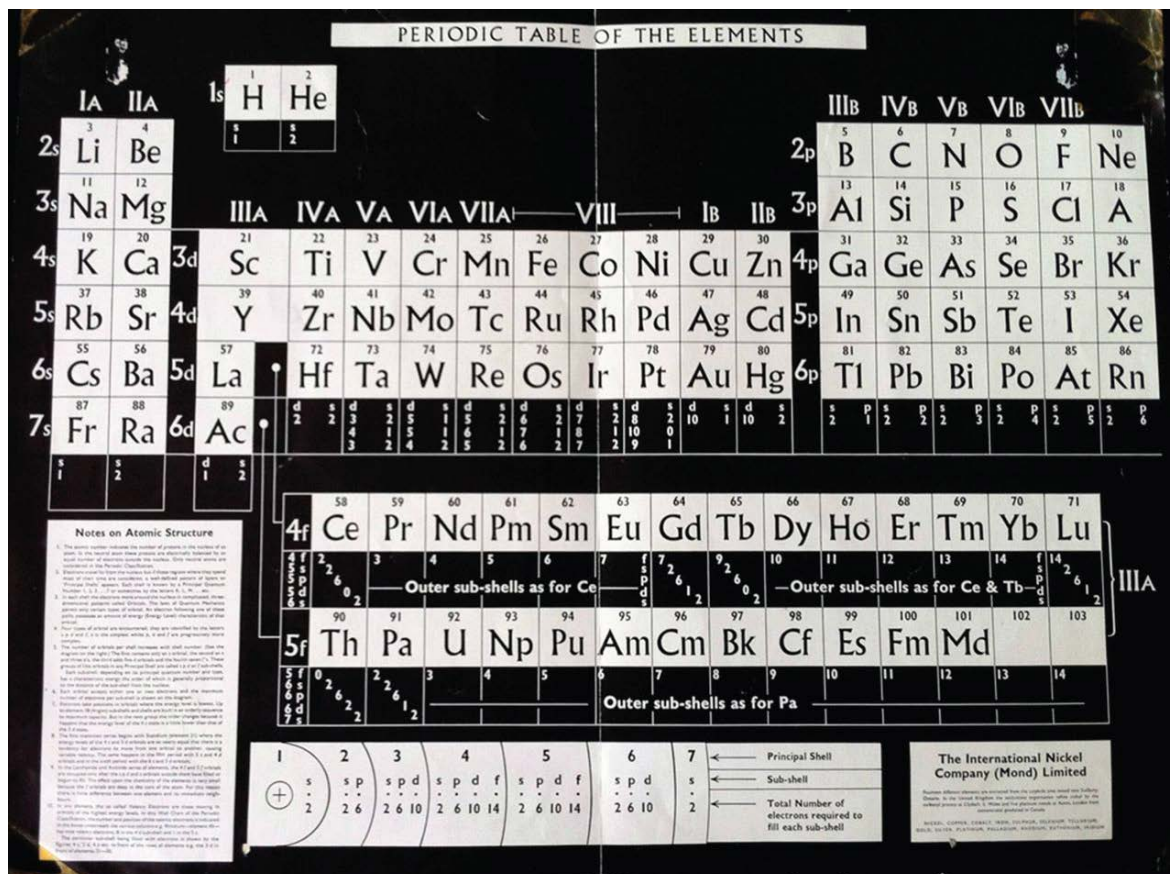


Рис. 1. Моя первая Периодическая таблица. (Фотография: Брэиди Харан).

химиков и не подозревают, что из-за интенсивной добычи и широкого использования цинк скоро окажется менее доступным, чем платина. Масштаб этой проблемы довольно хорошо очерчен в недавних дискуссиях, в ходе которых выяснилось, что людей, пользующихся мобильным телефоном в мире едва ли не больше, чем тех, кто пользуется зубной щеткой [7]. Ключевое значение имеет тот факт, что зубная щетка содержит пять или шесть наиболее распространенных элементов (H, C, O, N, Cl и, возможно, Si), в то время как современный мобильный телефон содержит более 30 элементов, а может быть, даже 40, и многие из них находятся под угрозой исчезновения [8]. Итак, как подчеркивалось в недавнем отчете Королевского общества [9], нашу планету ждет дальнейший рост населения и, соответственно, увеличение потребления. В то же время у нас есть ограниченный запас элементов для обеспечения этого потребления.

С 2011 по 2016 год я совмещал свою основную деятельность с работой на посту секретаря по иностранным делам и являлся одним из вице-президентов Королевского общества (Академии наук Соединенного Королевства и Содружества). Должность секретаря по иностранным делам существует с 1723 года, то есть возникла на шестьдесят лет раньше, чем должность министра иностранных дел в британском пра-

вительстве. В число моих предшественников входят такие люди, как ученый-энциклопедист Томас Юнг (ввел характеристику упругости – «модуль Юнга»; провел эксперимент по дифракции света при падении плоской волны на непрозрачный экран с двумя щелями, доказавший справедливость волновой теории света; внес вклад в расшифровку древнеегипетской иероглифики) и химик Эдуард Франкленд, основоположник концепции валентности и основатель металлоорганической химии. Суть миссии работника в этой должности обусловлена архаичным предписанием «наслаждаться обменом знаниями и взаимодействием со всевозможными иноземцами и иностранцами», – по сути, быть послом британской науки. Не задумываясь, я выбрал Периодическую таблицу в качестве своего офисного логотипа и носил галстук с символикой Периодической таблицы всякий раз, когда выполнял должностные обязанности (рис. 3).

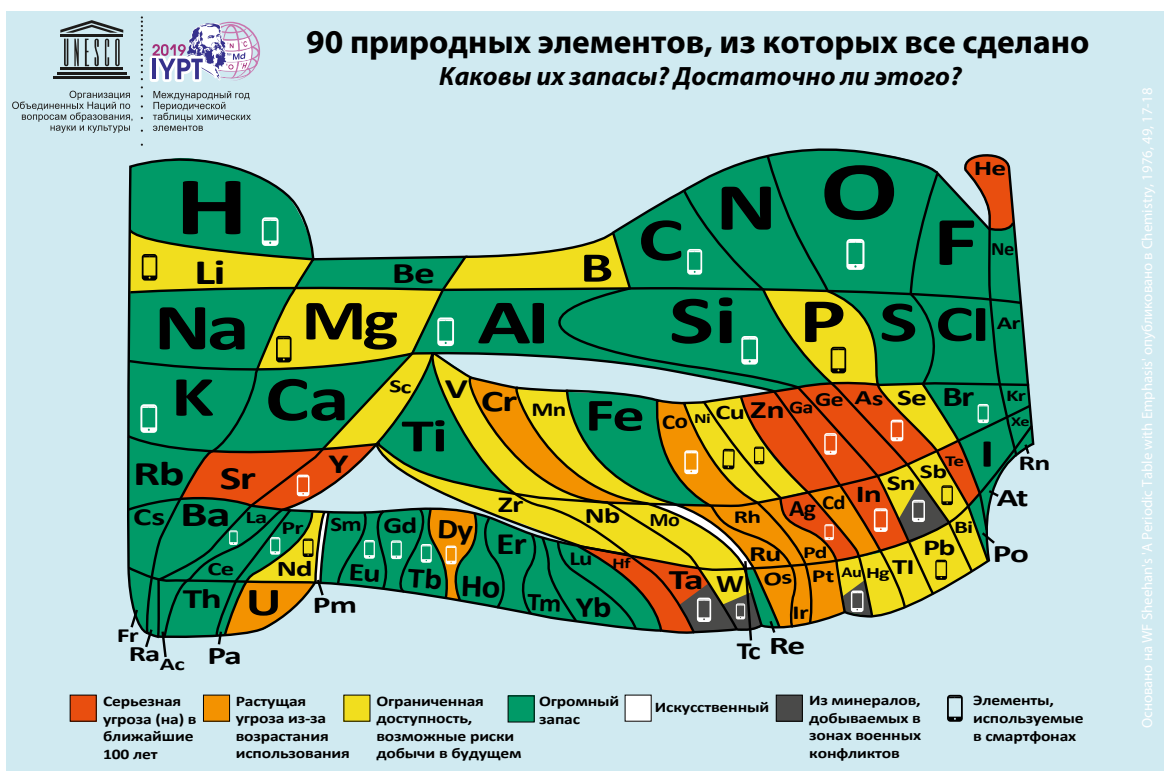


Рис. 2. Периодическая таблица «Вымирающие элементы». Разработано Дэвидом Коул-Гамильтоном и его коллегами по Европейскому химическому обществу (EuChemS) [6].

Неожиданно одиннадцать лет назад Периодическая таблица начала изменять мою собственную жизнь и жизнь нескольких моих коллег из Ноттингемского университета. 8 июня 2008 года мы начали сотрудничать с режиссером Брэйди Хараном для того, чтобы создать научно-популярную передачу «The Periodic Table of Videos» (PTOV, «Периодическая таблица в видеофильмах»), представляющую собой видеосериал на канале YouTube, по одной серии на каждый из 118 элементов в стандартной Периодической таблице (рис. 4) [10]. Проект должен был продлиться всего 6 недель, но, еще до того, как съемки были закончены, от публики были получены такие восторженные отклики [11], что стало ясно: программе нам придется продолжать [12]. Как ведущий, могу отметить, что

участие в проекте PTOV оказало на нас довольно неожиданное влияние.

Во-первых, участие в съемках позволило нам прикоснуться к областям химии, с которыми мы никогда раньше не сталкивались, например, увидеть необычайно красивый фиолетовый цвет солей плутония Pu (III) в растворе [13] или узнать о том, как очищают металлы платиновой группы [14]. Мы также получили доступ к бесценным историческим артефактам, таким как очки Джозефа Пристли (английский ученый, впервые получивший кислород в чистом виде) [15] или оригинальные образцы элемента рутения, принадлежавшие профессору Казанского университета<sup>1</sup> Карлу Клаусу. Интересно, что рутений – один из немногих элементов, открытых благодаря запаху одного из его соединений [16].

Во-вторых, мы с удовлетворением обнаружили, что большое количество людей разных возрастов и профессий по-настоящему очарованы Периодической таблицей. Даже очень сложные для восприятия аспекты вызвали реальный интерес, например, значительная корректировка значений атомных весов некоторых элементов [17]. Зрители со всего мира

<sup>1</sup> Казань, столица Республики Татарстан, была одной из «точек роста» химии в России, особенно органической химии со школами Н.Н. Зинина, А.М. Бутлерова и А.Е. Арбузова. Именно в Казани Н.Н. Зинин путем восстановления нитробензола впервые синтезировал анилин, и его оригинальный образец, несколько обесцвеченный из-за почтенного возраста, до сих пор хранится в музее в том самом здании химического факультета в университете, где он был синтезирован.



Рис. 3. Тот самый галстук с символикой Периодической таблицы.

отправляют нам сообщения, задают вопросы и даже заговаривают с нами в общественных местах. Такой энтузиазм радует, особенно сейчас, когда часто можно услышать, что молодое поколение считает химию скучной. Иногда именно очень молодые зрители проявляют особенный интерес: «Моя семья посещает Великобританию этим летом, и моя семилетняя дочь спросила, можем ли мы поехать в Ноттингем, потому что она одержима “Периодической таблицей на видео”. Посещение химического факультета и знакомство с участниками этого видеопроекта было бы для нее более захватывающим, чем знакомство с принцессами из мультфильмов Диснея для остальных ее одноклассниц» [18].

В-третьих, мы с удивлением обнаружили, насколько динамично изменялась Периодическая таблица за

последние шесть лет. Семь новых элементов были названы Коперниций (112), Нихоний (113), Флеровий (114), Московий (115), Ливерморий (116), Теннессин (117) и Оганесон (118). Команда РТОВ присутствовала на официальной церемонии присвоения названий четырем из этих элементов [19]. Кроме того, чтобы узнать о синтезе многих сверхтяжелых элементов и химических свойствах, РТОВ посетил места их рождения – Центр по изучению тяжелых ионов общества им. Гельмгольца в Дармштадте и Объединенный институт ядерных исследований в Дубне [20, 21]<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> В начале работы РТОВ мы практически ничего не знали о сверхтяжелых элементах, о чем свидетельствует наше первое видео [29] о хассии, элементе №108. Звуковая дорожка выглядит следующим образом: Брэйдли Харан: «Какой следующий элемент?» Мартин Полякофф (М.П.): «Хассий. Я ничего не знаю о хассии. Должны ли мы что-нибудь придумать?» Пауза. Затем М.П.: «Элемент 108 – это хассий, я абсолютно ничего не знаю об этом. Однако сила Периодической таблицы заключается в том, что, глядя на нее, я могу сказать: “Ну, по химическим свойствам он должен быть немного похож на железо, но он не будет точно таким же, как железо, потому что железо – легкий элемент, а когда элементы становятся тяжелее, их химические свойства меняются. Они имеют тенденцию иметь большее количество так называемых степеней окисления. И поэтому я могу предсказать, что, если бы хассий не был радиоактивным, он все равно был бы довольно ядовитым и мог бы представлять интерес как катализатор. Вероятно, он вступит в реакцию с окисью углерода и, если он будет стабильным, то он, вероятно, станет отличным дополнением к моей работе над докторской диссертацией!”»

**PERIODIC VIDEOS** The University of Nottingham  
UNITED KINGDOM · CHINA · MALAYSIA

Extra videos Molecules Roadtrips Photos YouTube Twitter Physics Email

NEW VIDEOS:

Find out more about the University of Nottingham

H																	He
Li	Be	[Group Photo]										B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	[Group Photo]										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

THE MOLECULAR VIDEOS Supported by ALDRICH

periodicvideos' sponsors include ALDRICH Chemistry click for more

Рис. 4. Снимок экрана веб-сайта проекта PTOV [10]. Теперь, на свой одиннадцатый день рождения, PTOV привлек 11 сотрудников из Ноттингемского университета, и на его счету 651 видео, рассказывающих о соединениях и элементах. У программы почти 1.2 миллиона подписчиков и более 198 миллионов просмотров.

Те, кто синтезирует эти сверхтяжелые элементы, исполнены оптимизма в отношении возможности наблюдения элементов с зарядовым числом  $Z > 118$ , например, элемента с  $Z = 120$  [22]. В связи с этим было бы интересно увидеть, как могла быть устроена Периодическая таблица после элемента с  $Z = 118$ . Пекка Пююккё (Pekka Ruukko) сделал прогноз для элементов с числом протонов до 172 (рис. 5) [23]. Этот диапазон охватывает не только блок  $bf$ -элементов, но

и беспрецедентную серию  $5g$ -элементов. Скептики могли бы отклонить такие предположения как слишком умозрительные, но зрители PTOV не согласны: видеофильм, посвященный статье П. Пююккё [24], собрал более 56 000 просмотров.

Работа над PTOV напомнила нам о том, что знания большинства химиков становятся все более сфокусированными и ограничиваются лишь их конкретной областью химии. В настоящее время очень немногие химики могут претендовать на энциклопедическую широту знаний, которую продемонстрировал Питер Садлер в своей замечательной презентации об элементах в живых организмах и лекарствах [25]. Такая

periodic table 1–172

eriod 1	periodic table 1–172																18 orbitals					
1	1 H	2														13	14	15	16	17	18 He	1s
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2s2p			
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3s3p			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	4s3d4p			
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	5s4d5p			
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	6s5d6p			
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113	114	115	116	117	118	7s6d7p			
8	119	120	121-122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	8s7d8p		
9	165	166											167	168			9s9p					

6	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	4f
7	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	5f
8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	6f

8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Рис. 5. Расширенная до элемента с Z=172 Периодическая таблица, предсказанная в работе [22]. Интересно, как выглядит принцип «застройки» для этих элементов, например, с 5g-элементами, лежащими между группами 2 и 13, и 6f-элементами между группами 14 и 3. (Изображение предоставлено П. Пююккё).

узкая специализация особенно печальна, потому что в результате лишь немногие химики-исследователи, занятые изучением новых рациональных и экологических химических процессов, знакомы с полной загадок химией элементов, богатой практическими данными, которые могут, например, открыть доступ к новым областям катализа. Надеемся, что Международный год Периодической таблицы подстегнет фантазию химиков и расширит их возможности. В более долгосрочной перспективе есть основания для оптимизма. Интернет и открытый доступ переносят химию в гораздо более широкую аудиторию, и, как и в астрономии, можно легко представить возрастающую роль заинтересованных любителей, у которых достаточно свободного времени для рассмотрения закономерностей в химических данных, которые были упущены перегруженными работой профессиональными исследователями. Кроме того, мы не должны забывать, что в исследовательских лабораториях лаборанты часто обладают более широкими фактическими знаниями о химических ре-

акциях, чем более высококвалифицированные и специализированные исследователи-теоретики.

В последние годы Периодическая таблица стала узнаваемой во всем мире рекламной картинкой (рис. 6). Большинство химиков, вероятно, не задумывались о том, как повезло нашей дисциплине иметь такой хорошо узнаваемый символ; у физиков, к сожалению, такого нет. Например, в городе Оксфорд (Великобритания) есть такси и автобус, украшенные Периодической таблицей, что весьма уместно, потому что 2013 год ознаменовал столетие публикации исторического доклада оксфордского физика Генри Мозли о рентгеновских спектрах элементов [28]. В его статье окончательно присвоены атомные номера элементам, что помогло объ-



Рис. 6. Периодическая таблица как дизайнерский ход для рекламного баннера. Этот плакат на платформе на железнодорожной станции Сибуя в Токио (сентябрь 2012 года) представляет «Научный отдел с девочками-элементами» как клубную деятельность японской женской поп-группы Sakura Gakuin (буквально «Академия цветения вишни») [26]. «Девочки-элементы» используются в качестве необычного учебного пособия в книге для преподавания Периодической таблицы [27]. (Фотография: Морган Томас).

яснить аномалии, такие, как явно обращенный с точки зрения атомного веса порядок следования в Периодической таблице кобальта и никеля. К сожалению, преждевременная гибель Г. Мозли на фронте во время Первой мировой войны (г. Галлиполи, Турция) в 1915 году помешала ему получить Нобелевскую премию за его выдающиеся открытия.

Какой-то единой, «истинной» Периодической таблицы не существует, притом что, вероятно, только стандартная «краткая форма» легко узнаваема широкой общественностью. К сожалению, эта стандартная форма не позволяет легко определить атомный номер конкретного элемента, не вглядываясь в мелкий шрифт. Напротив, последние «атомные часы», разработанные японским школьным учителем, делают эту задачу очень простой (рис. 7). Часы используют почти инстинктивную

способность людей конвертировать позицию на циферблате в количество минут, например, мгновенно активируя одну из них, видеть, что неодим имеет атомный номер 60. Таким образом, различные расположения элементов могут служить разным целям. Новые формы Периодической таблицы могут быть полезны для выделения определенных аспектов элементов. Будем надеяться, однако, что ни один экзаменатор не узнает о японских часах – ведь они имеют не менее 58 различных пар элементов, и каждая из них – это повод заставлять ленивых учеников сравнивать и противопоставлять их химические свойства!

В заключение отмечу, что Периодическая таблица стала легко узнаваемым большинством людей символом нашей профессии химика. При этом она также стала важным инструментом для наших исследований, постоянно напоминая нам о том, что еще предстоит открыть много новых аспектов химии, и побуждая нас исследовать химию менее популярных элементов. Конечно, их время придет и даст нам новые совершенно неожиданные материалы, катализаторы и реакции. Так что не медлите. Идите и исследуйте!

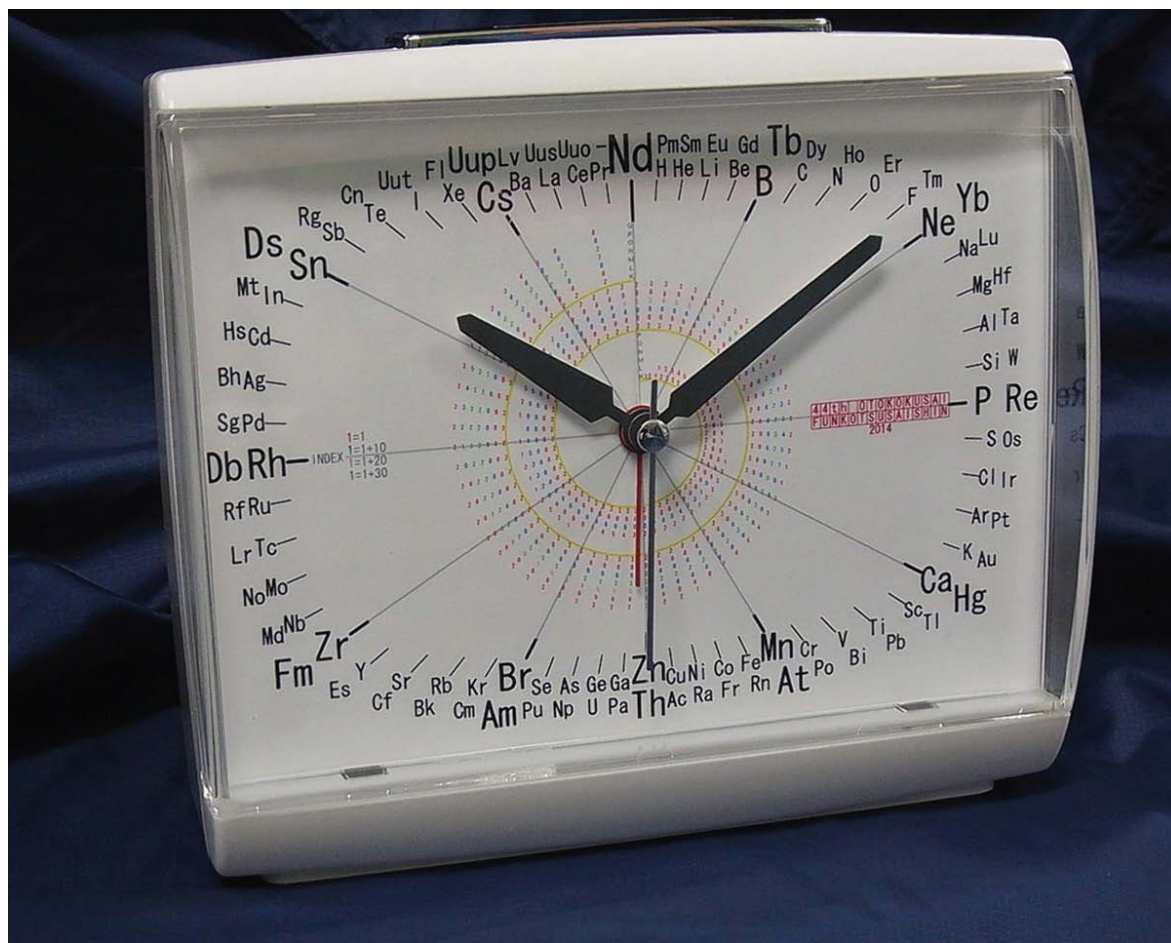


Рис. 7. Часы, разработанные Нагаясу Навой, учителем химии старшей школы Фусетсу университета Куруме, Япония. Это отличный пример того, как необычная форма Периодической таблицы может выделять определенные особенности, в данном случае атомный номер элемента [30]<sup>3</sup>. (Фотография любезно предоставлена господином Нагаясу Навой).

**Благодарности:** Я особенно благодарен Брэйди Харану за его дружбу и выдающуюся работу. Я также очень благодарен нашему неукротимому технику Нилу Барнсу и нашим коллегам по созданию программы PTOV Саманте Танг, Питу Лисенс, Дебби Кейс, Стиву Лиддлу, Даррену Уолшу, Робу Стокману, Джиму Гэмблу, Саймону Вудворду, Джону Мозесу и Андрею Хлобыстову и всем тем, кто позволил нам посетить их лаборатории или архивы. Я также благодарю организации, которые спонсировали

PTOV, включая Garfield Weston Trust, EPSRC, COST, Ноттингемский университет, семью DeSorcy, Briggs PLC, RSC, Aldrich Chemicals, Microsoft, благотворительный фонд Anamax и RACI. Наконец, я признателен Стюарту Тейлору и Королевскому обществу за разрешение использовать материалы статьи, опубликованной в «Философских транзакциях» [31].

## Литература

1. M. Poliakoff, B. Haran  
My First Periodic Table – Periodic Table of Videos, Periodic Videos, 2012. (<https://www.youtube.com/watch?v=iRmDvXEC0cs>).
2. A. Holderness, J. Lambert  
A New Certificate Chemistry, UK, London, Heinemann, 1961, 495 pp.

<sup>3</sup> «На циферблате в двойном круге – 118 атомных символов, от водорода H до элемента Uuo. Рядом с центром часов находится спиральная линия, вдоль которой написаны числа, представляющие электронную конфигурацию каждого атома, изображенного на внешних кругах (к числу в соответствии с цветовым индексом добавляются 10, 20 или 30). Эти часы были вручены в качестве приза победителю игр на спичках, проведенных в кабинете химии 27 апреля 2014 г., когда проходил наш школьный фестиваль, под девизом “FUNKOTSUSAISHIN или Делай все возможное”» (Н. Нава). Используемые часы: MAG T-511WH, производство NOA Co., Ltd.





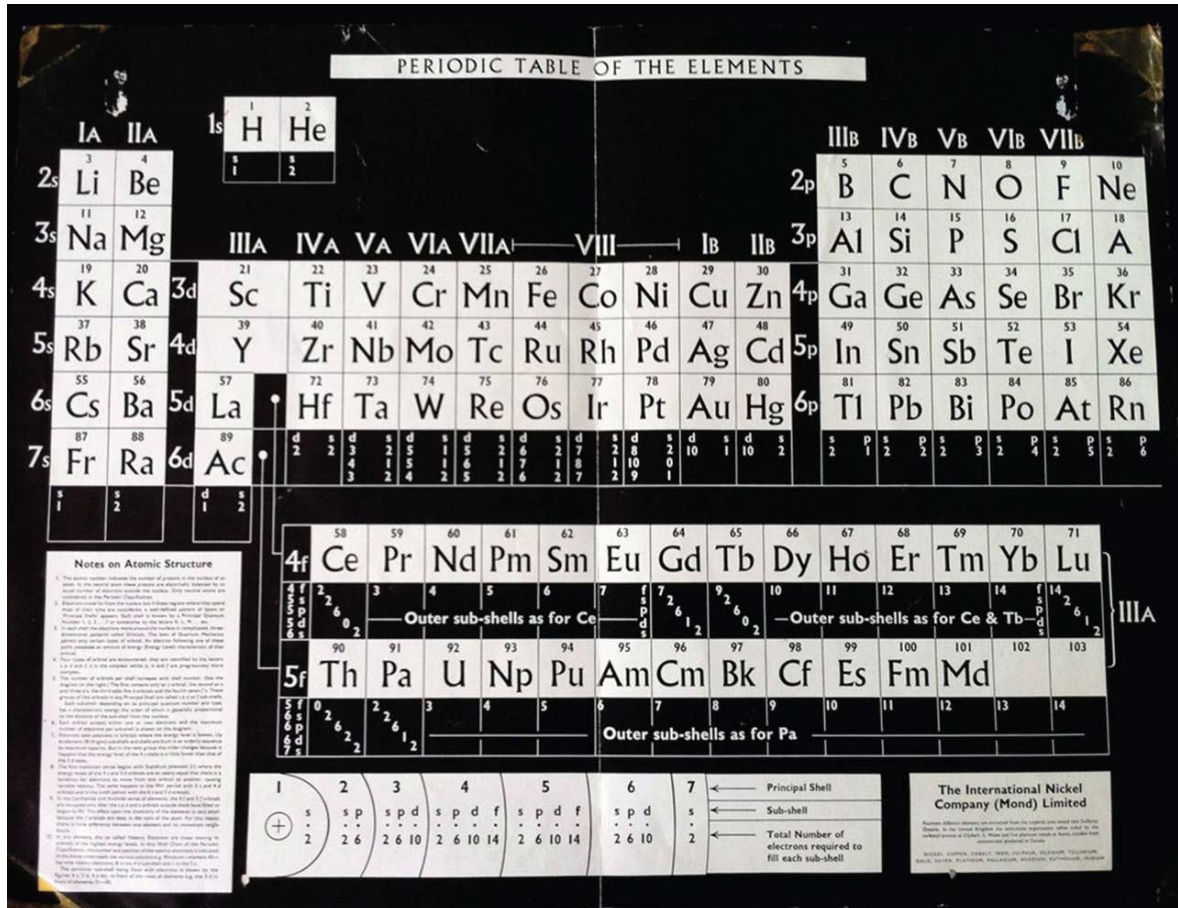


Fig. 1. My first Periodic Table. (Photo: Brady Haran).

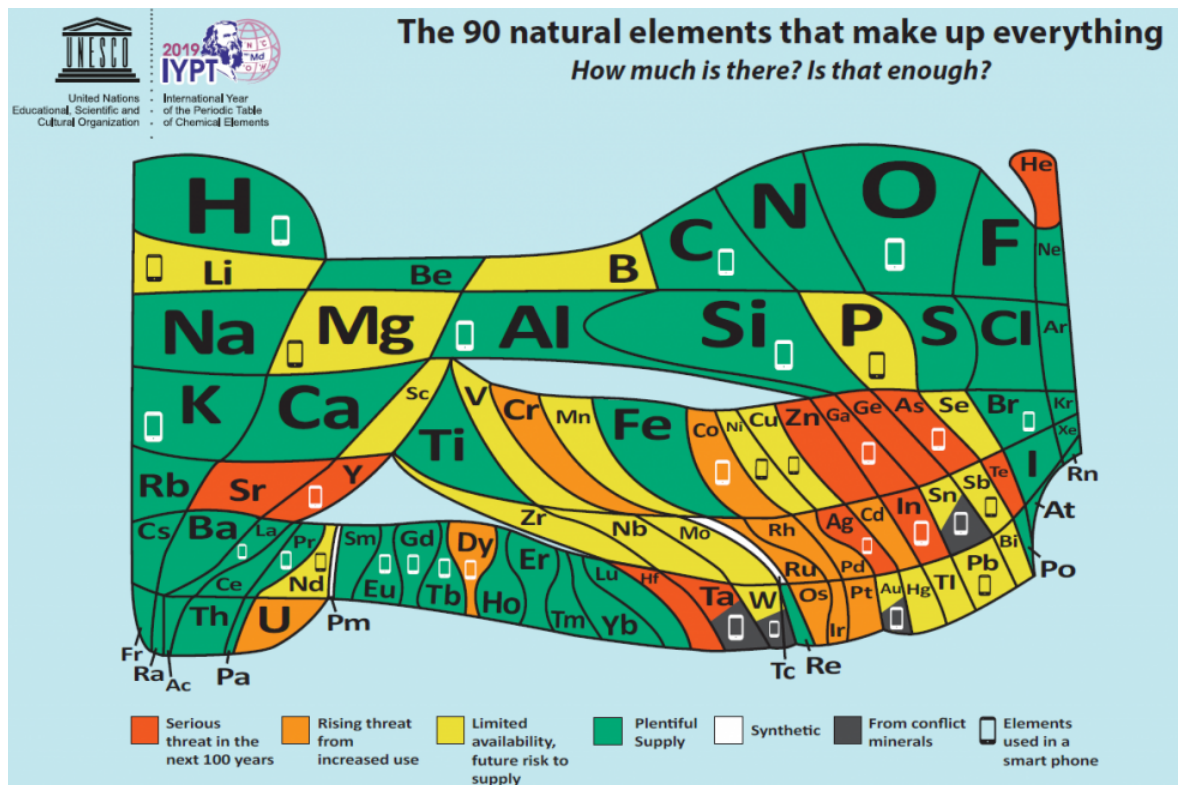


Fig. 2. The Periodic Table of “endangered elements”. Developed by David J. Cole-Hamilton and co-workers in the European Chemical Society (EuChemS) [6].



Fig. 3. The very necktie with symbols of the Periodic Table.



Fig. 6. The Periodic Table as an entertainment icon. This poster on a platform at Shibuya railway station in Tokyo (September 2012) introduces the “Science Department with Element Girls” as a club activity of the Japanese female pop group Sakura Gakuin (literally “Cherry Blossom Academy”) [26]. The “element girls” are used as an unusual teaching aid in a book for teaching the Periodic Table [27]. (Photo: Morgan Thomas).

**PERIODIC VIDEOS** The University of Nottingham  
UNITED KINGDOM · CHINA · MALAYSIA

Extra videos Molecules Roadtrips Photos YouTube Twitter Physics Email 23k 72k

**NEW VIDEOS:**

Find out more about the University of Nottingham

H																		He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

THE MOLECULAR VIDEOS Supported by ALDRICH

Cheeseburger Fingers Two Colour Diamond

periodicvideos' sponsors include ALDRICH Chemistry click for more

Fig. 4. Screenshot of the Periodic Table of Videos (PTOV) website [10]. Now, on its eleventh birthday, PTOV involves 11 members of staff at the University of Nottingham and has 651 videos covering compounds as well as elements. The program has got >1.2 million YouTube subscribers and >198 million views.

period 1 periodic table 1–172 18 orbitals

1	1	2															13	14	15	16	17	18	2	1s
	H																						He	
2	3	4															5	6	7	8	9	10	2s2p	
	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne		
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	3s3p					
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar						
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	4s3d4p					
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	5s4d5p					
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	6s5d6p					
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	7s6d7p					
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn												
8	119	120	121-122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	8s7d8p				
				156	157	158	159	160	161	162	163	164	139	140	169	170	171	172						
9	165	166															167	168	9s9p					

6	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	4f
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
7	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	5f
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	6f

8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5g

Fig. 5. The extended Periodic Table up to element 172 as predicted by Pyykkö [22]. It is interesting how the building-up principle for atomic orbitals appears for these elements with, for example, the 5g elements lying between groups 2 and 13 and the 6f elements between groups 14 and 3. (Image courtesy of P. Pyykkö).

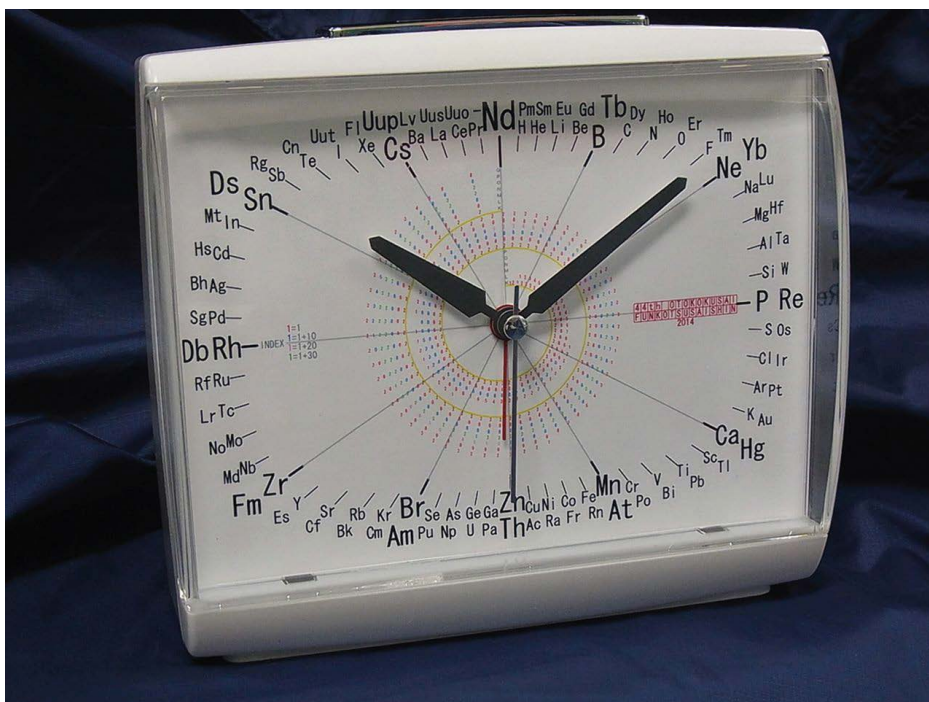


Fig. 7. Clock devised by chemistry teacher Nagayasu Nawa at Kurume University Fusetsu High School, Japan. It is an excellent example of how an unusual form of the Periodic Table can highlight particular features, in this case atomic number [30]. (Photo courtesy of N. Nawa).

## References

1. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*My First Periodic Table – Periodic Table of Videos*, Periodic Videos, 2012. (<https://www.youtube.com/watch?v=iRmDvXEC0cs>).
2. **A. Holderness, J. Lambert**  
*A New Certificate Chemistry*, UK, London, Heinemann, 1961, 495 pp.
3. **M. Poliakoff, P. Licence**  
*Nature*, 2007, **450**, 810. DOI: 10.1038/450810a.
4. **N. Asfaw, Y. Chebude, A. Ejigu, B.B. Hurisso, P. Licence, R.L. Smith, S.L.Y. Tang, M. Poliakoff**  
*Green Chem.*, 2011, **13**(5), 1059. DOI: 10.1039/c0gc00936a.
5. **C.O. Tuck, E. Perez, I.T. Horvath, R.A. Sheldon, M. Poliakoff**  
*Science*, 2012, **337**(6095), 695. DOI: 10.1126/science.1218930.
6. *The 90 Natural Elements that Make Up Everything*, EuChemS, 2019. (<https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2018/09/EuChemS-Periodic-Table-Element-Scarcity.pdf>).
7. **C. Raines**  
*More Mobile Phones Than Toothbrushes? Fact or Fiction*, 3.08.2016. (<https://blog.dentalimplants-usa.com/more-mobile-phones-than-toothbrushes-fact-or-fiction>).
8. **A. Brunning**  
*Elements of a Smartphone, 2014*. (<http://www.compoundchem.com/wp-content/uploads/2014/02/Chemical-Elements-Smartphone.png>).
9. *People and the Planet: Report, the Royal Society*, 2012. ([https://royalsociety.org/-/media/Royal\\_Society\\_Content/policy/projects/people-planet/2012-04-25-PeoplePlanet.pdf](https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/projects/people-planet/2012-04-25-PeoplePlanet.pdf)).
10. *Periodic Videos*. ([www.periodicvideos.com](http://www.periodicvideos.com), [www.youtube.com/periodicvideos](http://www.youtube.com/periodicvideos)).
11. **S.K. Ritter**  
*Chem. Eng. News*, 2008, **86**(37), 42.
12. **B. Haran, M. Poliakoff**  
*Angew. Chem. Intl. Ed.*, 2013, **52**(34), 8758. DOI: 10.1002/anie.201304861.
13. **M.J. Sarsfield, S.T. Liddle, M. Poliakoff, B. Haran**  
*Real plutonium*, Periodic Videos, 2012. (<https://www.youtube.com/watch?v=89UNPdNtOoE>).
14. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Super Expensive Metals*, Periodic Videos, 2013. ([www.youtube.com/watch?v=Fg2WzCzKpYU](http://www.youtube.com/watch?v=Fg2WzCzKpYU)).
15. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Famous Science Spectacles*, Periodic Videos, 2013. ([www.youtube.com/watch?v=eILNyJdpTSo](http://www.youtube.com/watch?v=eILNyJdpTSo)).
16. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*The Professor in Russia*, Periodic Videos, 2013. ([www.youtube.com/watch?v=7wITZXTT4sA](http://www.youtube.com/watch?v=7wITZXTT4sA)).
17. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Changes to the Periodic Table*, Periodic Videos, 2010. ([www.youtube.com/watch?v=qQ48TwPKHiQ](http://www.youtube.com/watch?v=qQ48TwPKHiQ)).
18. **Q. Rayner**  
*BBC East Midlands Today: Special Visitor to Periodic Videos*, Periodic Videos, 2014. (<http://www.youtube.com/watch?v=IeGu-ZCJVdQ>).
19. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Elements Inauguration*, Periodic Videos, 2017. (<https://www.youtube.com/watch?v=Nkz5ZAL3jSc>).
20. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Super Heavy Elements*, Periodic Videos, 2010. ([www.youtube.com/watch?v=z3oY-XHwss8](http://www.youtube.com/watch?v=z3oY-XHwss8)).
21. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*The Element Creator*, Periodic Videos, 2017. (<https://www.youtube.com/watch?v=1VaY9N7Alq0>).
22. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Future Elements*, Periodic Videos, 2017. ([https://www.youtube.com/watch?v=SBz\\_NDq6g6E](https://www.youtube.com/watch?v=SBz_NDq6g6E)).
23. **P. Pyykkö**  
*PCCP*, 2011, **13**(1), 161. DOI: 10.1039/c0cp01575j.
24. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Bigger Periodic Table*, Periodic Videos, 2010. ([www.youtube.com/watch?v=taksrWsEM-0](http://www.youtube.com/watch?v=taksrWsEM-0)).
25. **P. Chellan, P.J. Sadler**  
*Phil. Trans. R. Soc. A: Math., Phys. Eng. Sci.*, 2015, **373**, 20140182. DOI: 10.1098/rsta.2014.0182.
26. *Sakura Gakuin*. ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sakura\\_Gakuin](http://en.wikipedia.org/wiki/Sakura_Gakuin)).
27. **Shinkeikaku**  
*Element Girls Periodic Table – Learning Basic Chemistry through Moe*, Blog, 2010. (<http://shinkeikaku.wordpress.com/2010/12/11/element-girls-periodic-table-learning-basic-chemistry-through-moe/>).
28. **H.G.J. Moseley**  
*Phil. Mag.*, 1913, **26**(156), 1024. DOI: 10.1080/14786441308635052.
29. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Hassium (old version)*, Periodic Videos, 2008. (<http://www.youtube.com/watch?v=VQ8cZoA0tiU>).
30. **M. Poliakoff, B. Haran**  
*Periodic Table Clock (Certified as AMAZING)*, Periodic Videos, 2014. (<http://www.youtube.com/watch?v=gJlciLYTQjc>).
31. **M. Poliakoff, S. Tang**  
*Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, **373**, 20140211. DOI: 10.1098/rsta.2014.0211.

## Международный год Периодической таблицы химических элементов

*Н.П. Тарасова*

Проведение Международного года Периодической таблицы химических элементов в 2019 году имеет принципиальное значение для нашей страны. Ведь именно 150 лет тому назад, в 1869 году, великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев опубликовал свою первую схему Периодической таблицы. Международный год Периодической таблицы химических элементов должен привлечь внимание мировой общественности к развитию фундаментальных наук, к углублению и расширению образования для устойчивого развития, к грандиозным проблемам современности, решить которые без активного использования достижений современной химии невозможно. Качество повседневной жизни нынешних и будущих поколений человечества напрямую связано с успехами и достижениями современной химической науки и технологии. В 2019 году как в России, так и во всем мире пройдут масштабные мероприятия, посвященные Д.И. Менделееву и его научному наследию. Международный год Периодической системы химических элементов еще раз подчеркивает важность системности в нашем хаотическом мире. Ведь именно система дает возможность понять саму идею закономерности, а значит, вооружает человечество способностью к предвидению.

**Ключевые слова:** Международный год Периодической таблицы химических элементов, Д.И. Менделеев, Международный союз по теоретической и прикладной химии (ИЮПАК).

20 декабря 2017 года на 74 пленарном заседании 72 сессии Генеральной Ассамблеи Организации Объединенных Наций была принята резолюция, посвященная науке, технологии и инновациям для развития [«Science, technology and innovation for development (document A/72/422/Add.2)»] [1]. Пунктом 31 этой резолюции ООН провозгласила «...год, начинающийся 1 января 2019 года, Международным годом Периодической таблицы химических элементов в целях повышения осведомленности мировой общественности о фундаментальных науках и расширения образования в области фундаментальных наук, уделяя особое внимание странам развивающегося мира, для повышения качества повседневной жизни и в том числе для будущих достижений в области научных исследований и раз-

работок...» и предложила «...Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО), действуя в пределах имеющихся ресурсов, выступить в качестве ведущего учреждения по проведению этого международного года в сотрудничестве с другими соответствующими учреждениями». Резолюция также призвала «...соответствующие организации системы Организации Объединенных Наций к тому, чтобы они, действуя в рамках своих мандатов и имеющихся ресурсов, обеспечивали, чтобы при осуществлении настоящей резолюции ни один человек и ни одна страна не были обойдены вниманием».

Обсуждению в ООН предшествовало обсуждение в ЮНЕСКО, Генеральная конференция которой 2 ноября 2017 года на своей 39 сессии рекомендовала Генеральной Ассамблее ООН принять на ее 72 сессии резолюцию о провозглашении Организацией Объединенных Наций 2019 года Международным годом Периодической таблицы химических элементов.

В Пояснительной записке [2] к резолюции, подчеркивалось в частности, что провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической та-



**ТАРАСОВА**

**Наталья Павловна**

член-корреспондент РАН, профессор,  
директор Института химии и проблем устойчивого  
развития, РХТУ им. Д.И. Менделеева  
Паст-президент ИЮПАК

блицы химических элементов станет признанием важной роли фундаментальных наук, в особенности химии и физики, в решении многочисленных задач развития, которые встают перед государствами-членами в ходе осуществления принятой Организацией Объединенных Наций Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. Празднование этого Международного года также предоставит возможность по достоинству оценить недавнее открытие в результате тесного международного научного сотрудничества четырех сверхтяжелых элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева с атомными номерами 113 (нихоний), 115 (москвовий), 117 (теннессин) и 118 (оганесон) и присвоение им названий.

Было подчеркнуто, что проведение в 2019 г. Международного года Периодической таблицы химических элементов позволит отметить 150-летие создания Периодической таблицы химических элементов русским ученым Дмитрием Менделеевым, который считается одним из отцов современной химии. В документе также упомянуто, что важнейшим достижением Д.И. Менделеева является предсказание в 1869 г. свойств еще не открытых в то время пяти элементов и их соединений, для которых он оставил места в Периодической таблице.

В Пояснительной записке отмечалось, что провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической таблицы химических элементов предоставит Международной программе ЮНЕСКО по фундаментальным наукам (IBSP) обширные возможности для выполнения ее задачи по продвижению международного сотрудничества в области фундаментальных наук в интересах устойчивого развития, а также сотрудничества в области естественнонаучного образования и создания потенциала, в частности в рамках программы по научным микроэкспериментам, посвященной Периодической таблице химических элементов. Этот Международный год должен также способствовать запуску широкого спектра коллективных проектов в продолжение Международного года химии и Международного года кристаллографии, прошедших под эгидой ЮНЕСКО в 2011 г. и 2014 г. соответственно.

В свете вышеизложенного, Генеральной конференции ЮНЕСКО было предложено принять следующую резолюцию:

*«Генеральная конференция,  
рассмотрев документ 39 С/60,*

*признавая важность химии и прогресс в исследованиях и открытиях, связанных с Периодической таблицей химических элементов, для достижения устойчивого развития и общего блага человечества,*

*подчеркивая, что Периодическая таблица широко применяется в таких ключевых областях научных знаний, как химия, физика и биология,*

*принимая во внимание, что празднование в 2019 г. 150-летия Периодической таблицы химических элементов предоставит уникальную возможность подчеркнуть непрерывный характер научных открытий в различных контекстах, уделив особое внимание популяризации естественнонаучного образования на всех уровнях среди молодых женщин и мужчин, особенно в развивающихся странах, в том числе в Африке,*

*отмечая, что 2019 г. будет юбилейным для целого ряда важных вех в истории Периодической таблицы химических элементов, в частности, выделения мышьяка и сурьмы Хабир ибн Хайяном примерно 1200 лет назад, открытия фосфора 350 лет назад, составления Антуаном Лавуазье в 1789 г. списка 33 химических элементов, сгруппированных в такие категории, как газы, металлы, неметаллы и земельные элементы, открытия закона триад Дёберейнером в 1829 г., открытия Периодической таблицы Менделеевым 150 лет назад и открытия франция Маргаритой Перей в 1939 г.,*

*сознавая, что 2019 г. дает возможность привлечь внимание к выдающимся научным достижениям, совершенным человечеством после открытия в 1869 г. Дмитрием Менделеевым Периодической таблицы химических элементов...*

*...предлагает Генеральному директору поддержать все усилия, направленные на провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической таблицы химических элементов;*

*рекомендует Генеральной Ассамблее Организации Объединенных Наций принять на ее 72-й сессии резолюцию о провозглашении Организацией Объединенных Наций 2019 г. Международным годом Периодической таблицы химических элементов».*



Принятие резолюций стало возможным благодаря скоординированным действиям ученых, представляющих различные области науки, национальных и международных научных союзов, дипломатов и обычных граждан, в частности колоссальной работе, которую на протяжении 2016-2017 гг. проводили Международный союз по теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева, Отделение химии и наук о материалах РАН, многие российские и зарубежные ученые [3]. Инициативу Международного года горячо поддержали Международный союз теоретической и прикладной физики (IUPAP), Европейский союз химических обществ (EuChemS), Международный астрономический союз (IAU), Международный союз истории и философии науки и технологии (IUNPS), более 70 национальных организаций – членов IUPAC, академии наук, химические общества, научно-исследовательские институты.

В рамках Международного года Периодической таблицы химических элементов особую роль сыграло празднование Международного дня женщин в науке 11 февраля 2019. Специальный международный симпозиум “Making Their Table: Women and the Periodic Table of Elements” был проведен в Университете Мурсии (Murcia), Испания [4]. В открытии новых химических элементов Периодической системы выдающиеся женщины-химики сыграли очень важную роль. Достаточно упомянуть Марию Кюри, которая была награждена Нобелевскими премиями в 1903 и 1911 годах за открытие радия и полония, Иду Ноддак за открытие рения (Re), Маргариту Катрин Перей за открытие франция и многих других выдающихся женщин в истории химии.

Церемония открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов прошла

в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже 29 января 2019 года [5].

На 2019 год – Международный год Периодической таблицы химических элементов – запланированы многие мероприятия [6, 7], среди них:

- 53-я Международная Менделеевская олимпиада школьников по химии, Санкт-Петербург, апрель;

- «Менделеев-150»: 4-я Международная конференция, посвященная Периодической таблице, под эгидой ИЮПАК, Санкт-Петербург, июль 2019 г.;

- 51-я Международная химическая олимпиада, Париж, июль;

- 5-я Европейская конференция по неорганической химии (EICC-5) под эгидой EuChemS, Москва, июнь;

- торжества по случаю 150-летнего юбилея Таблицы химических элементов Д.И. Менделеева во время 47-го Международного химического конгресса ИЮПАК, в том числе специальный Симпозиум «Периодической таблице – 150 лет», Париж, июль.

Заккрытие Международного года Периодической таблицы химических элементов пройдет 5 декабря 2019 г. в Токио.

В Российской Федерации в год 150-летия Периодической таблицы будут проведены масштабные мероприятия, посвященные выдающемуся ученому Д.И. Менделееву и его научному наследию. Организационный комитет Года возглавляет Д.А. Медведев. План мероприятий включает проведение различных выставок, конференций, симпозиумов, встреч с участием выдающихся ученых [8]. В сентябре в Санкт-Петербурге пройдет центральное мероприятие Года в России – XXI Менделеевский съезд, посвященный 150-летию Периодической системы и такому же юбилею Российского химического общества.

Международный год Периодической таблицы химических элементов и формулирование Д.И. Менделеевым самого закона о периодичности свойств химических элементов еще раз подчеркивают важность системности в современном хаотическом мире. Ведь именно система дает возможность понять саму идею закономерности, а значит, вооружает человечество способностью к предвидению.

В заключение позволю себе привести цитату из «Заветных мыслей» Д.И. Менделеева: «Может быть, я и ошибаюсь, но все же полагаю, что в эпоху “переоценки ценностей” полезно предъявить то, что считаешь общей ценностью, пускай переоценивают, а то, пожалуй, подумают, что ничего ценного нет и у людей науки и что все дело в молотках “ценовщиков”» [9]. Это в полной мере относится к Периодической таблице химических элементов.



## Ведущая роль ЮНЕСКО в проведении Международного года Периодической таблицы химических элементов

Н.А. Цивадзе

В соответствии с резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН 2019 год был провозглашен Международным годом Периодической таблицы химических элементов, а ведущей организацией по его проведению была определена Организация Объединенных Наций в области науки, образования и культуры (ЮНЕСКО). На сегодняшний день ЮНЕСКО является крупнейшим специализированным учреждением ООН, обладающим широкой компетенцией по обеспечению сотрудничества государств по вопросам науки, способным играть уникальную роль в укреплении мира и устойчивого развития. Установлением памятных дат ООН стимулирует интерес к деятельности и программам организации в этих областях, а также содействует активизации деятельности на международном уровне. Провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической таблицы является признанием важной роли фундаментальных наук, в частности достижений в области химии и физики, в решении стоящих перед современным миром многочисленных задач развития на пути осуществления принятой ООН «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». Международный год под эгидой ЮНЕСКО дает возможность мобилизовать все заинтересованные стороны вокруг темы «Наука за мир и развитие» – от государственных деятелей до представителей СМИ и учеников школ.

**Ключевые слова:** Международный год Периодической таблицы химических элементов, Д.И. Менделеев, ЮНЕСКО, устойчивое развитие, открытая наука.

В соответствии с резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН текущий 2019 год был провозглашен Международным годом Периодической таблицы химических элементов<sup>1</sup>, а ведущей организацией по его проведению была определена Организация Объединенных Наций в области науки, образования и культуры (ЮНЕСКО)<sup>2</sup>.

В свете 65-летия членства России в ЮНЕСКО это дата имеет особое значение. Как было отмечено Президентом России во время беседы



в рамках официального визита Генерального директора ЮНЕСКО Одри Азуле в Россию, ЮНЕСКО была, есть, остается ключевой международной межправительственной организацией, работающей в области гуманитарных связей<sup>3</sup>. Россия готова ак-

<sup>1</sup> Международный год Периодической таблицы химических элементов был провозглашен Генеральной ассамблеей ООН и одобрен Генеральной конференцией ЮНЕСКО (A/RES/72/228, 39 C/60, [https://www.un.org/en/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/72/228&Lang=R](https://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/72/228&Lang=R)).

<sup>2</sup> Об истории продвижения идеи и принятия решения о провозглашения Международного года Периодической таблицы см. статьи [1, 2].

<sup>3</sup> Встреча Президента Российской Федерации В.В. Путина с Генеральным директором ЮНЕСКО Одри Азуле, 06.03.2019, Москва, Кремль. (<http://kremlin.ru/events/president/transcripts/59980>).



**ЦИВАДЗЕ**  
Наталья Аслановна  
ЮНЕСКО, Сектор естественных наук

тивно поддерживать усилия ЮНЕСКО в этом направлении<sup>4</sup>.

Именно в год юбилея открытия Периодической таблицы мы вновь обращаемся к вопросу о роли естественных наук в развитии общества. Можно сказать, что гений великого Д.И. Менделеева вновь обращает наше внимание на особую актуальность этой работы в наше время, которое является сложным периодом в целом в международных отношениях, характеризуется напряженностью в политической и неопределенностью в экономической сферах. Переход на новый технологический уклад предполагает изменения в целом в общественном устройстве государств. Как при этом обеспечить мирный переход и вместе с этим право каждого человека на доступ к знаниям и новым технологиям, как не потерять преимущества, которые нам предоставляют знания, а использовать во благо всех людей на Земле?

Как 150 лет назад научное сообщество, погруженное в хаос обретенных знаний, должно было найти ключ, общий принцип, который бы помог понять, как устроен мир, так сегодня мы находимся в поисках модели управления наукой. Однако без понимания значения и роли науки для общества, его устойчивого развития такой модели не выработать.

Так образно описывают значение открытия авторы публикации под названием «Новый миропорядок: 150 лет Периодической таблице»: «Несмотря на стремительные темпы открытий, а может, и благодаря этому в химии тогда царил полнейший хаос. Химики по-прежнему не понимали значение понятия “химический элемент”... Несмотря на неразбериху и неопределенность, накопленные знания о различных элементах и их особенностях были настолько велики, что кто-то должен был навести порядок. Найти логику, которая позволила бы понять связи между различными элементами, а возможно, и суть самих материалов» [3].<sup>5</sup>

Сможет ли справиться с такой задачей ЮНЕСКО?

На сегодняшний день организация является крупнейшим специализированным учреждением ООН,

обладающим широкой компетенцией по обеспечению сотрудничества государств по вопросам образования, науки и культуры, способным играть уникальную роль в укреплении мира и устойчивого развития. В представленном на рассмотрение государств – членов Исполсовета ЮНЕСКО предложении об исследовании целесообразности принятия рекомендации по концепции «Открытой науки» говорится о необходимости утверждения ведущей роли организации на международной арене, закрепления «своего сравнительного преимущества перед другими международными организациями» в вопросах научного сотрудничества и особой ответственности за популяризацию международно признанного права человека заниматься наукой<sup>6</sup>. При сохраняющемся статусе международной площадки с наибольшим представительством стран, ЮНЕСКО, несомненно, способна и должна выполнять данную роль<sup>7</sup>. На примере обсуждения регулирования другой актуальной проблематики, связанной с выработкой общих принципов регулирования применения технологий искусственного интеллекта, обращалось внимание на исключительную роль ЮНЕСКО как интегратора существующих правотворческих инициатив различных международных и региональных институций<sup>8</sup>. «Действительно, наша Организация является единственной, в которой можно достичь такого глобального консенсуса», отметила Генеральный директор ЮНЕСКО

<sup>4</sup> Выступление главы российской делегации А.И. Кузнецова на 206-й сессии Исполсовета ЮНЕСКО, Париж, 11.04.2019 г. (<http://www.unesco.ru/ru/?module=news&action=view&id=989>).

<sup>5</sup> См. также: “Dmitry Mendeleev, the Man Who Brought Law and Order to Chemistry”, UNESCO Courier, Paris, June 1971. (<https://en.unesco.org/courier/1971-7/dmitry-mendeleev-man-who-brought-law-and-order-chemistry>).

<sup>6</sup> Предварительное исследование технических, финансовых и правовых аспектов целесообразности принятия рекомендации ЮНЕСКО по Открытой науке, UNESCO, Executive Board, 2019, 206th. ([https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367018\\_rus](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367018_rus)).

<sup>7</sup> В настоящее время организация включает 193 членов и 11 ассоциированных членов. ([http://www.unesco.org/eri/cp/ListeMS\\_Indicators.asp](http://www.unesco.org/eri/cp/ListeMS_Indicators.asp)).

<sup>8</sup> UNESCO conference on “Principles for AI: Towards a Humanistic Approach?” Remarks by Angel Gurría OECD Secretary-General, 04.03.2019, Paris, France, (<http://www.oecd.org/fr/apropos/secretairegeneral/unesco-conference-on-principles-for-ai-towards-a-humanistic-approach-march-2019.htm>).

Одри Азуле, открывая 206-ю сессию Исполсовета<sup>9</sup>.

При этом деятельность Организации, как и других международных структур, проходит в условиях продолжающегося кризиса мировой экономики, сохраняющихся конфликтов в различных регионах и серьезных природных катаклизмов<sup>10</sup>. Очевидно, что именно сейчас для мира стратегически важное значение имеет развитие сотрудничества в области образования, науки и культуры. Когда общества во всём мире сталкиваются с растущим давлением перемен, а международное сообщество – с новыми проблемами, возрастает роль механизмов, обеспечивающих сохранение диалога и взаимодействия между странами на основе определения и признания общих ценностей и устремлений человечества. Поэтому в системе специализированных учреждений ООН ЮНЕСКО занимает особое место. Согласно статье 1 Устава, ЮНЕСКО «ставит себе задачу содействовать укреплению мира и безопасности, способствуя сотрудничеству народов путем образования, науки и культуры в интересах обеспечения всеобщего уважения к справедливости, законности, правам человека и основным

свободам, провозглашенным в Уставе Организации Объединенных Наций, для всех народов, без различия расы, пола, языка или религии»<sup>11</sup>. Для определения своих научных программ ЮНЕСКО опирается на выводы и рекомендации Всемирной встречи на высшем уровне по устойчивому развитию<sup>12</sup>, а также Всемирной конференции по науке<sup>13</sup>, подтвердившие важную роль науки в качестве основы для принятия дальновидных решений и определения правильных политических стратегий в области устойчивого развития. Обновленная Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» представляет собой конкретизацию роли науки, технологий и инноваций в обеспечении устойчивого развития. ЮНЕСКО входит в состав целевой группы ООН, возглавляющей глобальный Механизм содействия развитию технологий, который начал свою работу 26 сентября 2015 года. Деятельность данного Механизма направлена на содействие в реализации целей устойчивого развития путем укрепления сотрудничества в вопросах науки, технологий и инноваций и расширения доступа к достижениям в этой области, а также путем поощрения обмена знаниями на взаимосогласованных условиях<sup>14</sup>.

Распространение знаний в условиях ускоренного темпа развития науки и применения новых технологий на всё более многочисленные области жизни каждого человека становится определяющим фактором их реализации. Общество должно понимать содержание и значение открытий, определивших развитие современной науки, а информация о новых изобретениях должна становиться известной самому широкому кругу людей. Именно этим пониманием

<sup>9</sup> Выступление Генерального директора Одри Азуле на 206-й сессии Исполсовета ЮНЕСКО Париж, 08.04.2019. (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367599?posInSet=1&queryId=N-e60a1195-a7e3-4d61-a515-c79dfed9bc1d>).

<sup>10</sup> Сложные отношения между государствами также нашли отражение в решениях США и Израиля о выходе из ЮНЕСКО. (Les États-Unis et Israël quittent l'UNESCO. <http://www.lefigaro.fr/international/2018/12/31/01003-20181231ARTFIG00116-les-etats-unis-et-israel-quittent-l-unesco-ce-lundi-soir.php> Publié le 31/12/2018; Israel and US exit UNESCO <http://en.rfi.fr/americas/20190101-israel-united-states-quit-unesco-palestine-west-bank>).

<sup>11</sup> Устав Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, принят 16 ноября 1945 г. [4].

<sup>12</sup> Йоханнесбургская декларация по устойчивому развитию. Принята на Всемирной встрече на высшем уровне по устойчивому развитию (Йоханнесбург, Южная Африка, 26 августа – 4 сентября 2002 года). ([https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/declarations/decl\\_wssd.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/decl_wssd.shtml)).

<sup>13</sup> Конференция организуется Венгерской академией наук в сотрудничестве с ЮНЕСКО, Международным научным советом и Американской ассоциацией развития науки. Раз в два года этот форум собирает ученых, руководящих работников, а также представителей неправительственных организаций, образовательных и исследовательских институтов. В этом году специальная сессия в партнерстве с ИЮПАК и «ФосАгро» будет посвящена Международному году Периодической таблицы. (<https://worldscienceforum.org/>).

<sup>14</sup> Доклад ЮНЕСКО по науке (UNESCO World Science report) показывает, что научные исследования являются как ускорителем экономического развития, так и определяющим фактором построения более устойчивых и экологически благополучных обществ. [5].

руководствуется ЮНЕСКО в своих усилиях, которые предпринимаются организацией со времени своего создания в различных областях своей компетенции в масштабе всего мира.

Провозглашение 2019 г. Международным годом Периодической таблицы химических элементов является признанием важной роли фундаментальных наук, в частности достижений в области химии и физики, в решении стоящих перед современным миром многочисленных задач развития на пути осуществления принятой Организацией Объединенных Наций «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». В мотивирующей части документа, обосновывающего целесообразность придания статуса международной даты в рамках ООН, Периодическая таблица химических элементов характеризовалась как комплексный научный концепт, служащий катализатором международного сотрудничества в области фундаментальных наук и основой научных открытий и достижений<sup>15</sup>.

Практика провозглашения Организацией Объединенных Наций специальных дат (дни, недели, года и десятилетия), посвященных определенным мероприятиям, проблематике или темам, имеет целью привлечение внимания к задачам Организации и активизации усилий в поддержку их реализации. Установлением памятных дат ООН стимулирует интерес к программам и деятельности организации в этих об-

ластях, а также содействует активизации деятельности на международном уровне. В рамках своей компетенции ЮНЕСКО является инициатором целого ряда дат, которым посвящен специальный раздел официального сайта<sup>16</sup>. По тематике естественных наук успешно проводились Года и Международные дни, посвященные химии, кристаллографии, свету и другим научным направлениям, однако дат, посвященных научным открытиям, не было. Уникальный характер и беспрецедентно единодушная поддержка международным научным сообществом российской инициативы по объявлению Международного года в честь открытия великого русского ученого Д.И. Менделеева обусловлены фундаментальным базовым значением Периодического закона для всех наук<sup>17</sup>.

Торжественное открытие Международного года в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже (рис. 1) получило широкое освещение в мировых СМИ и социальных сетях<sup>18</sup>. Значение открытия отмечено специальными

<sup>15</sup> Предложение о провозглашении Организацией Объединенных Наций 2019 г. Международным годом Периодической таблицы химических элементов. UNESCO, Executive Board, 2017, 202nd. ([https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000259063\\_rus](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000259063_rus)).

<sup>16</sup> UNESCO: International Years. (<https://en.unesco.org/commemorations/international-years>).

<sup>17</sup> Mark Lorch, "International Year of the Periodic Table: 150th Anniversary of Dimitri Mendeleev's Genius Creation" [«Международный год Периодической таблицы: 150-я годовщина гениального открытия Дмитрия Менделеева»], 07.01.2019. (<https://www.newsweek.com/periodic-table-150-genius-iconic-symbol-science-1281821>): «Таблицу химических элементов сейчас можно увидеть почти в любой лаборатории. ...Периодическая таблица элементов стала **традиционным, культовым символом науки**» (выделено мною – Н.Ц.).

Maria Gunther, Dagens Nyheter, "I Februari 1869 fick Mendelejev Ordning på Kemin" [«В феврале 1869 года Менделеев навел порядок в химии»], 03.03.2019. (<https://www.dn.se/nyheter/vetenskap/i-februari-1869-fick-mendelejev-ordning-pa-kemin>): «...Прорыв в науке – настолько значительный, что Генеральная ассамблея ООН и ЮНЕСКО объявили 2019 год Международным годом Периодической системы, чтобы отметить ее 150-летний юбилей».

<sup>18</sup> Приведем здесь избранные заголовки публикаций мировых СМИ, которые показывают, насколько значимым является это открытие: D. Linkoln, "150 Years Ago, Science Changed Forever", 20.02.2019, (<https://edition.cnn.com/2019/02/20/opinions/periodic-table-birth-year-opinion-linkoln/index.html>); E. Scerri, "Happy Sesquicentennial, Periodic Table! (The organizing scheme that revolutionized our understanding of the chemical elements turns 150 in 2019)", 22.01.2019, (<https://blogs.scientificamerican.com/observations/happy-sesquicentennial-periodic-table/>); T. Pradeep, "The Table that Defines Chemistry Turns 150", 09.02.2019, (<https://www.thehindu.com/sci-tech/the-table-that-defines-chemistry-turns-150/article26224712.ece>); J. Rosen, "The Fascinating Backstory of the Periodic Table, Which is About to Turn 150 Years Old", 31.01.2019, (<https://www.latimes.com/science/sciencenow/la-sci-sn-periodic-table-150-birthday-20190131-story.html>); A. Schiphorst, "The Periodic Table of Chemical Elements and Us", 11.02.2019, (<https://www.euroscientist.com/the-periodic-table-of-chemical-elements-and-us/>); CBC News, "O Mg! It's the Periodic Table's B Day!", 16.01.2019, (<https://www.cbc.ca/news/canada/ottawa/periodic-table-birthday-1.4979745>); D. Samson, "Iconic Periodic Table Now Turning 150 Years Old This Year", 02.02.2019, (<https://www.techtimes.com/articles/238258/20190202/iconic-periodic-table-now-turning-150-years-old-this-year.htm>).



Рис. 1. Открытие Международного года Периодической таблицы химических элементов, выступление Генерального директора ЮНЕСКО Одри Азуле. ЮНЕСКО, Париж, 29 января 2019 г. (UNESCO Photos ©UNESCO/Christelle ALIX).

выпусками ведущих научных изданий *Nature* и *Science*, которые были посвящены Периодической таблице и признанию выдающейся роли Дмитрия Ивановича Менделеева в формулировании универсального для всей мировой науки закона [6, 7].

Наиболее яркими моментами церемонии открытия<sup>19</sup> стали лекции Нобелевского лауреата по химии Бернарда Феринга на тему «Периодическая таблица для общества и будущего», а также члена Британского королевского химического общества профессора сэра Мартина Полякоффа. Очень важно, что в день открытия прозвучали две великолепные лекции российских ученых (рис. 2), отметил президент РАН академик А.М. Сергеев, – это лекция академи-

ка Юрия Цолаковича Оганесяна, научного руководителя Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, о недавно открытых элементах Периодической таблицы и лекция профессора РАН Александра Анатольевича Лутовинова, заместителя директора Института космических исследований РАН, о космическом происхождении химических элементов<sup>20</sup>.

В рамках открытия состоялось подписание соглашения между российской компанией «ФосАгро» и ЮНЕСКО о продлении сотрудничества в реализации программы «Зеленая химия для жизни». Этот проект реализуется совместно с Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC) и является примером развития научно-исследовательского потенциала в области «зеленой химии», использования результатов научной деятельности для охраны окружающей среды и внедрения экологически безопасных технологий. В рамках проекта предоставляются гранты молодым ученым из раз-

<sup>19</sup> Трансляция Торжественной церемонии открытия Международного Года в Париже, ЮНЕСКО. (<http://webcast.unesco.org/live/room-01/ru>).

<sup>20</sup> Доклад президента Российской академии наук Александра Сергеева о роли Международного года Периодической таблицы химических элементов в развитии химической науки в России и укреплении имиджа российской науки в мире, Заседание Организационного комитета по подготовке и проведению в 2019 году Международного года Периодической таблицы химических элементов. (<http://government.ru/news/35651/>).



Рис. 2. Российская делегация в ЮНЕСКО. (©Татьяна Дьякова).

вивающихся стран, работающим над применением передовых технологий современной химии в таких областях, как охрана окружающей среды, здравоохранение, обеспечение продовольствием, использование природных ресурсов<sup>21</sup>.

К открытию Года была приурочена Интерактивная химическая выставка «Наука для всех», подготовленная Всероссийским фестивалем науки «НАУКА 0+» при поддержке Благотворительного фонда «Искусство, наука и спорт» и вызвавшая живой интерес публики, в особенности студентов и школьников. В рамках развития работы в области популяризации науки стратегия ЮНЕСКО заключается не только в повышении осведомленности о Периодической таблице химических элементов, но и в продвижении химии и науки в целом. Мобильная международная экспозиция, посвященная химии и ее современным достижениям, была представлена участниками из России, Великобритании, Франции, Нидерландов, США, Швейцарии, Китая, Японии. На стендах экспонентов все желающие могли принять участие в химических экспериментах, познакомиться с актуальными результатами работ ведущих научно-исследовательских групп в области химии и материаловедения, пообщаться с известными учеными и юными исследовате-

лями. Самой популярной площадкой выставки стал молекулярный бар, блюда и напитки в котором опытные бармены готовили с использованием законов физики и химии. Также на выставке можно было протестировать химических роботов и узнать соотношение химических элементов в организме.

В своем выступлении Генеральный директор ЮНЕСКО Одри Азуле поблагодарила Правительство Российской Федерации и партнеров в организации церемонии за оказанную поддержку и выразила уверенность в том, что Международный год станет прекрасной возможностью для активизации международного научно-технического сотрудничества, позволит создать новые формы кооперации.

Новый подход к представлению научного открытия в ЮНЕСКО в развитие сложившихся традиций [8] заложил основу для популяризации науки в различных форматах и, без-

<sup>21</sup> ЮНЕСКО, «ФосАгро» и Международный союз теоретической и прикладной химии объединяют усилия в поддержку «зеленой химии». (<https://ru.unesco.org/news>).





Рис. 3. Открытие Международного года Периодической таблицы химических элементов. ЮНЕСКО, Париж, 29 января 2019 г. (UNESCO Photos ©UNESCO/Christelle ALIX).

условно, задал активное движение по устройству мероприятий по всему миру. Среди многих представлений Таблицы в рамках экспозиции посетители могли познакомиться с новой версией Периодической таблицы, разработанной студией Артемия Лебедева. Эта работа сама стала открытием другого международного конкурса и получила золото в соответствующей номинации<sup>22</sup>.

Популяризация – это интерфейс науки и общества, как писал Сергей Капица, лауреат Премии Калинга за искусство популяризации науки, присуждаемой ЮНЕСКО с 1952 г. Наводя мосты между наукой и обществом, ЮНЕСКО обеспечивает граж-

данам получение информации о новых тенденциях в области науки, подчеркивая одновременно роль ученых в расширении нашего понимания устройства жизни. Можно с уверенностью утверждать, что в ходе проведения Международного года Периодической таблицы интерфейс будет существенно усовершенствован. Международный год под эгидой ЮНЕСКО дает возможность мобилизовать все заинтересованные стороны вокруг темы «Наука за мир и развитие» – от государственных деятелей до представителей СМИ и учеников школ. ЮНЕСКО решительно призывает всех присоединиться к празднованию Международного года, организуя собственные мероприятия (рис. 3).

Не только смысл и ценность Периодического закона располагает к такому движению, но и сама личность Дмитрия Ивановича Менделеева располагает к поиску новых форм и смыслов. Периоди-

<sup>22</sup> iF World Design Guide, Periodic Table of Elements. (<https://ifworlddesignguide.com/search?search=Lebedev#/pages/page/entry/259038-periodic-table-of-elements>). “iF Design Award” – премия, ежегодно выбирающая лучшие образцы промышленного, коммуникационного, упаковочного и других видов дизайна. Премия была основана в 1954 году, и за время существования стала одной из самых авторитетных в мире наград в области дизайна. За всю 60-летнюю историю золото в номинации в России получали до этого только один раз. Таблица Менделеева, разработанная в студии Артемия Лебедева, уникальна тем, что является настраиваемым макетом, который пользователь настраивает под себя в зависимости от нужного ему уровня сложности. Всего доступно более 100 000 различных вариантов таблицы. Это позволяет любому учащемуся, ученому и преподавателю найти идеальный вариант для решения текущих задач. (<https://periodic.artlebedev.ru/>).

ческая таблица химических элементов Д.И. Менделеева «...увенчала усилия ученых многих стран обнаружить значимую систему в свойствах основных веществ», – так писали Г. Тетерин и К. Терлон, авторы статьи «Эта таблица на стене лаборатории» («That Chart on the Laboratory Wall») [9], посвященной Дмитрию Менделееву – человеку, благодаря которому «изучение химии шагнуло от средневекового движения на ощупь в современную науку». Великие ученые и изобретатели будоражат людское воображение. О Ньюtone, например, говорят, будто он открыл закон притяжения после того, как ему на голову упало яблоко, о Джеймсе Уатте – что кастрюля кипящей воды подсказала ему идею создания паровой машины. О Менделееве же пишут, что Периодическая таблица привиделась ему во сне! В заключение авторы статьи замечают, что «мы склонны забывать о том, что если научная истина вдруг, как молния, озаряет человека, то этот ученый потратил несколько лет, изучая данный предмет. Луи Пастер говорил: “Удача всегда одаривает лишь подготовленные умы”».

Образ и мысли великого ученого привлекают и увлекают людей по всему миру заниматься наукой. Личность Д.И. Менделеева, задачи, которые он ставил, и цели, которых добивался, и сегодня остаются для нас критериями для оценки решений в области развития науки, технологий и образования. Наряду с научной работой Д.И. Менделеев активно занимался экономическими и социальными делами. Он был ближайшим советником председателя Комитета министров Российской империи Сергея Витте, консультировал российское правительство по вопросам сельского хозяйства и торговых соглашений, работал над введением таможенных пошлин и налогов на импорт для защиты российской экономики. Ученый также одним из первых выступил за академическое образование для женщин и способствовал открытию для них лекториев и курсов.

Значение Периодической таблицы в истории мировой науки и масштаб личности ее автора позволяет России как инициатору проведения Междуна-

родного года предложить закрепить в повестке работы ЮНЕСКО ежегодное празднование открытия Периодического закона химических элементов. На состоявшемся 6 февраля 2019 года заседании Организационного комитета проведения Международного года Периодической таблицы химических элементов было рассмотрено предложение Президента РАН академика А.М. Сергеева об учреждении (совместно с ЮНЕСКО) международной премии имени Д.И. Менделеева в области фундаментальных наук, что подчеркнуло бы междисциплинарный характер его открытия<sup>23</sup>. В настоящее время под эгидой ЮНЕСКО учреждено 23 премии, в том числе 12 премий в сфере науки: пять премий по естественным наукам и семь премий по социальным и гуманитарным наукам.

Нет более соответствующего настоящему времени явления в науке, которое бы так отражало потребность современного общества в установлении равновесия, гармонии и устойчивого развития. Нет другой такой личности в истории мировой науки, которая бы так убедительно воплощала бы в себе единство науки, образования и искусства. Представляется, что учреждение Премии ЮНЕСКО имени Дмитрия Ивановича Менделеева станет наилучшим символом и стимулом в достижении тех целей, которые призвана реализовывать в соответствии со своим мандатом Организация Объединенных Наций в области науки, образования и культуры.

## Литература

1. N. Tarasova *Chem. Int.*, 2018, 40(2), 2. DOI: 10.1515/ci-2018-0201.
2. J. Reedijk, N. Tarasova *Chem. Int.*, 2019, 41(1), 2. DOI: 10.1515/ci-2019-0101.
3. И. Нэво *Новый миропорядок: 150 лет Периодической таблице*, Иносми.ру, (<https://inosmi.ru/science/20190308/244705526.html>),

Ориг. публ. שדח ימלוע רדס הלבוט הנש 150 תירוחמה הלבטל הנש, Yedioth Ahronoth, 08.02.2019.

(<https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5460188,00.html>).

4. ЮНЕСКО. *Основные документы: Изд. 2018 г., вкл. тексты документов и изменения, принятые Генеральной конференцией на 39-й сессии, Франция, Париж, ЮНЕСКО, 2018, 220 р.* ([https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261751\\_rus](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261751_rus)).

<sup>23</sup> Инициатива учреждения Премии была поддержана Председателем Правительства Российской Федерации Д.А. Медведевым: «Мне кажется, это абсолютно правильно. Причем если такую премию учредить, то она должна быть весомой во всех смыслах этого слова». (<http://government.ru/news/35651>).





Fig. 2. The Russian delegation to UNESCO. (©Tatyana Dyakova).



Fig. 3. Opening of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements. UNESCO, Paris, January 29, 2019. (UNESCO Photos ©UNESCO/Christelle ALIX).

## References

1. **N. Tarasova**  
*Chem. Int.*, 2018, **40**(2), 2. DOI: 10.1515/ci-2018-0201.
2. **J. Reedijk, N. Tarasova**  
*Chem. Int.*, 2019, **41**(1), 2. DOI: 10.1515/ci-2019-0101.
3. **I. Nevo [ובנ יתיא]**  
*New World Order: 150 years of the periodic table* [שדח ימלוע רדס: 150 תירוזחמה הלבטל הנש], Yedioth Ahronoth, 08.02.2019. (<https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5460188,00.html>).
4. UNESCO. *Basic Texts: 2018 Ed., incl. texts and amendments adopted by the General Conference at its 39th session*, France, Paris, UNESCO, 2018, 221 p. (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261751>).
5. UNESCO *Science Report: Towards 2030 – Executive Summary*, UNESCO, 2015. (<http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/unesco-science-report-towards-2030-ex-sum-en.pdf>).
6. *Science, Special Issue: Periodic Table Turns 150*, 2019, **363**, Iss. 6426. (<https://science.sciencemag.org/content/363/6426>).
7. *Nature, Collection: The Periodic Table*, 2019, 565. (<https://www.nature.com/collections/daffidjhif>).
8. **Y. Coppens**  
*Impact of Science on Society*, 1988, No. 152, 301. (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000082308>).
9. **G. Teterin, C. Terlon**  
*The UNESCO Courier*, 1971, **24**(6), 24.

## Российский вклад в Периодическую систему

Е.А. Баум, В.В. Лунин

Созданием Периодической системы и формулировкой Периодического закона российский ученый Д.И. Менделеев положил конец 50-летнему поиску взаимосвязи между массой атомов и свойствами элементов. Последовавшие вскоре открытия предсказанных им химических элементов подтвердили фундаментальное значение его закона как основного закона естествознания. Работы ученых Объединенного института ядерных исследований из Дубны по синтезу трансурановых и сверхтяжелых элементов с порядковыми номерами 113–118 на границе Периодической таблицы, выполненные за последние 50 лет, являются бесспорным свидетельством правомерности закона периодичности химических элементов и торжества достижений российской науки.

**Ключевые слова:** Периодическая система, Периодический закон, Д.И. Менделеев, рутений, трансурановые элементы, Г.Н. Флёрв, Ю.Ц. Оганесян, сверхтяжелые элементы.

### Создание Периодической системы и формулировка Периодического закона

150 лет назад, 17 февраля (1 марта) 1869 года, Дмитрий Иванович Менделеев впервые обнаружил Периодическую систему химических элементов, которая наконец упорядочила известные к тому времени 63 элемента путем их размещения в форме таблицы по возрастанию атомных весов. Спустя несколько недель ученый разослал коллегам первый вариант своей таблицы («Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сродстве»)<sup>1</sup>. Построение «Естественной системы элементов» к ноябрю 1870 г. завершило исследовательскую работу по Периодическому закону, проделанную ученым за год и девять месяцев. В статье «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов»<sup>2</sup> ученый предложил таблицу в более совершенной форме, отмечая в ней в частности, что ранее отдельные факты не укладывались в рамки составленной к марту 1869 г.

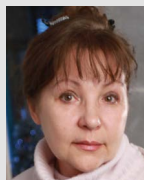
таблицы: «Часть элементов, а именно церитовые элементы, уран и индий, не находили надлежащего места в системе... <...> В настоящее время такие отступления от периодической законности... уже могут быть устранены с большею полнотою» [2]. В новой таблице Д.И. Менделеев аргументированно выбрал надлежащие места для урана, церитовых металлов, индия и др. Сопоставляя физико-химические характеристики элементов, ученый обосновывает места в таблице для еще не открытых элементов и предлагает для них условные названия (рис. 1, 2, 3).

Своим открытием Д.И. Менделеев положил конец 50-летнему поиску взаимосвязи между массой атомов и свойствами элементов<sup>3</sup>. Он обосно-

<sup>1</sup> Эту работу И.С. Дмитриев, директор Музея-архива Д.И. Менделеева при Санкт-Петербургском государственном университете, рассматривает как «составление «первой пробы»... системы элементов... и открытие концептуального ядра Периодического закона» [1]. Основные положения своего открытия Д.И. Менделеев сформулировал также в статье «Соотношение свойств с атомным весом элементов», опубликованной в «Журнале РХО» (Российского химического общества) в мае того же года.

<sup>2</sup> О ней ученый доложил 3 декабря 1970 г. на экстренном заседании РХО. «Естественная система элементов» Д.И. Менделеева сразу же вошла во 2-ю часть 1-го издания «Основ химии» в 1871 г.

<sup>3</sup> Так, заканчивая «Основы химии», в начале 1871 г. он констатировал: «...Вся сущность, вся природа элементов выражается в их весе, то есть в массе вещества, вступающего во взаимодействие. <...> Физические и химические свойства элементов, проявляющиеся в свойствах простых и сложных тел, ими образуемых, стоят в периодической зависимости... от их атомного веса» [3].



**БАУМ**

**Елена Анатольевна**

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова



**ЛУНИН**

**Валерий Васильевич**

академик, профессор,  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

вал понятие о месте элемента в Периодической системе как «узле, в котором пересекаются» закономерные изменения свойств элементов по горизонтали и по вертикали (то есть в пределах ряда и группы). Таким образом, место, которое должен был занять элемент в Периодической системе, позволяет достаточно детально описать его свойства, и в этом заключалась ее великая предсказательная сила. Об этом писал Д.И. Менделеев в работе «Периодическая законность для химических элементов»: «Система элементов имеет значение не только педагогическое, не только облегчает изучение разнообразных фактов, приводя их в порядок и связь, но имеет и чисто научное значение, открывая аналогии и указывая через то новые пути для изучения элементов» [4].

**Л. Мейер и Д.И. Менделеев: споры о приоритете**

В 1860-е гг. сопоставлением атомных весов элементов с учетом их физико-химических характеристик занимался известный немецкий химик Юлиус Лотар Мейер (1830–1895), которого именуют основным «конкурентом» Д.И. Менделеева. Приняв участие в знаменитом Конгрессе

**ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ**

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ

H = 1	Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
Be = 9,4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
Mg = 24	Al = 27,4	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35	
Zn = 65,2	Fe = 56	Ni = 59	Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200	
Ca = 40	Sc = 45	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	
Strontium = 87,6	Rhodium = 104,4	Palladium = 106,6	Cadmium = 112	Mercury = 127	Gold = 197	
Ba = 137	Platinum = 197,4	Iridium = 192	Osmium = 192	Rhodium = 186	Platinum = 182	
Thorium = 118	Uranium = 238	Thorium = 232	Uranium = 238	Thorium = 232	Uranium = 238	

Д. Менделѣевъ

Рис. 1. Первый печатный вариант «Опыта системы элементов» (1869).

в Карлсруэ (1860 г.) и глубоко впечатлившись статьей Станислао Канниццаро (1826–1910), Л. Мейер начал писать свой учебник “Die Modernen Theorien der Chemie und ihre Bedeutung für die Chemische Statik” («Современные химические теории и их значение для химической статики»), опубликованный

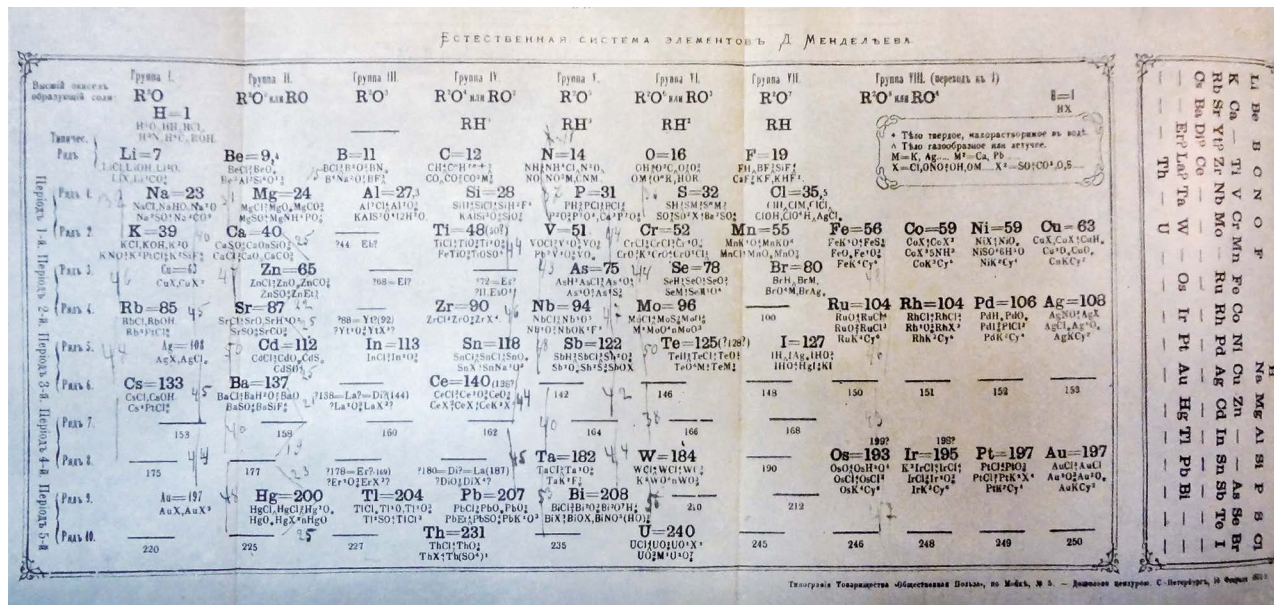


Рис. 2. Печатный оттиск «Естественной системы элементовъ Д.И. Менделѣева» (1871). Такая таблица была представлена в начале второй части «Основ химии».

*Лейбниц*  
*высший окисель образующий соли:*  
*2 ур.*  
*высший окисель образующий соли:*

	Группа I. $R^2O$ $H=1$ $H^2O, NH_4Cl, H^3N, H^4C, ROH.$	Группа II. $R^2O^2$ или $RO$	Группа III. $R^2O^3$	Группа IV. $R^2O^4$ или $RO^2$ $RH^4$	
Ряд 1.	Li=7 LiCl, LiOH, Li <sup>2</sup> O. LiX, Li <sup>2</sup> CO <sub>3</sub>	Be=9,4 BeCl <sub>2</sub> , BeO <sub>2</sub> , Be <sup>3</sup> Al <sup>2</sup> Si <sup>4</sup> O <sub>11</sub>	B=11 BCl <sub>3</sub> , B <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , BN*, B <sup>3</sup> Na <sup>2</sup> O <sup>3</sup> , BF <sub>3</sub>	C=12 CH <sub>4</sub> , C <sup>n</sup> H <sup>2n+2</sup> , CO, CO <sub>2</sub> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	N NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , NO, N <sub>2</sub> O
Ряд 2.	Na=23 NaCl, NaHO, Na <sup>2</sup> O Na <sup>2</sup> SO <sub>4</sub> , Na <sup>2</sup> CO <sub>3</sub>	Mg=24 MgCl <sub>2</sub> , MgO, MgCO <sub>3</sub> , MgSO <sub>4</sub> , MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub>	Al=27,3 Al <sup>2</sup> Cl <sub>3</sub> , Al <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , KAlSi <sup>3</sup> O <sub>8</sub> , 12H <sup>2</sup> O.	Si=28 SiH <sub>4</sub> , SiCl <sub>4</sub> , SiH <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , KAlSi <sup>3</sup> O <sub>8</sub> , SiO <sub>2</sub>	
Ряд 3.	K=39 KCl, KOH, K <sup>2</sup> O KNO <sub>3</sub> , K <sup>2</sup> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , K <sup>2</sup> SiF <sub>6</sub>	Ca=40 CaSO <sub>4</sub> , CaOnSiO <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub> , CaO, CaCO <sub>3</sub>	?44=Eb?	Ti=48(so?) TiCl <sub>4</sub> , TiO <sub>2</sub> , Ti <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , FeTiO <sub>3</sub> , TiOSO <sub>4</sub>	V VOCl <sub>3</sub> , Pb <sup>3</sup>
Ряд 4.	Cu=63 CuX, CuX <sub>2</sub>	Zn=65 ZnCl <sub>2</sub> , ZnO, ZnCO <sub>3</sub> , ZnSO <sub>4</sub> , ZnEt <sub>2</sub>	?68=El?	?72=Es? ?H, EsO <sup>2</sup> ?	
Ряд 5.	Rb=85 RbCl, RbOH. Rb <sup>2</sup> PtCl <sub>6</sub>	Sr=87 SrCl <sub>2</sub> , SrO, SrH <sup>2</sup> O <sup>2</sup> , SrSO <sub>4</sub> , SrCO <sub>3</sub>	<i>89 Yt</i> ?88=Yt(92) ?Yt <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , YtX <sup>3</sup> ?	Zr=90 ZrCl <sub>4</sub> , ZrO <sub>2</sub> , ZrX <sub>4</sub> .	Nt NbO, Nb <sup>2</sup> O <sub>5</sub>
Ряд 6.	Ag=108 AgX, AgCl*	Cd=112 CdCl <sub>2</sub> , CdO, CdS, CdSO <sub>4</sub>	In=113 InCl <sub>3</sub> , In <sup>2</sup> O <sub>3</sub>	Sn=118 SnCl <sub>4</sub> , SnCl <sub>2</sub> , SnO*, SnX <sub>4</sub> , SnNa <sup>2</sup> O <sup>2</sup>	
Ряд 7.	Cs=133 CsCl, CsOH. Cs <sup>2</sup> PtCl <sub>6</sub>	Ba=137 BaCl <sub>2</sub> , BaH <sup>2</sup> O <sup>2</sup> , BaO BaSO <sub>4</sub> , BaSiF <sub>6</sub>	<i>La 139</i> ?138=La? = Di?(144) ?La <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , LaX <sup>3</sup> ?	Ce=140 <del>(138)</del> CeCl <sub>3</sub> , Ce <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , CeO <sub>2</sub> , CeX <sub>3</sub> , CeX <sub>2</sub> , CeK <sup>2</sup> X <sup>6</sup>	
Ряд 8.	153	158	<i>Er 170</i> ?178=Er(169) ?Er <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , ErX <sup>3</sup> ?	<i>Di 175-190</i> ?180=Di? = La(187) ?DiO <sub>2</sub> , DiX <sup>4</sup> ?	Tt Ta <sub>2</sub> 1
Ряд 9.	Au=197 AuX, AuX <sub>3</sub>	Hg=200 HgCl <sub>2</sub> , HgCl <sub>2</sub> Hg <sup>2</sup> O*, HgO*, HgX <sup>2</sup> nHgO	Tl=204 TlCl <sub>3</sub> , Tl <sup>2</sup> O, Tl <sup>2</sup> O <sub>2</sub> , Tl <sup>2</sup> SO <sub>4</sub> , TlCl <sub>3</sub>	Pb=207 PbCl <sub>2</sub> , PbO, PbO <sub>2</sub> , PbEt <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , PbK <sup>2</sup> O <sup>2</sup> , B	
Ряд 10.	220	225	227	Th=231 ThCl <sub>4</sub> , ThO <sub>2</sub> , ThX <sub>4</sub> , Th(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	

Фотокопия 29. Часть таблицы «Естественной системы элементов» с пометками Д. И. Менделеева

Рис. 3. Часть таблицы «Естественной системы элементов» с пометками автора.

в 1864 году<sup>4</sup>. В одной из глав своей книги, ученый затрагивает тему «специфических закономерностей», которые были им обнаружены в атомных массах, и составляет две таблицы, первая из которых включала двадцать восемь элементов, сгруппированных по возрастанию атомного веса и валентности, вторая содержала оставшиеся двадцать два элемента<sup>5</sup>. Им были определены некоторые нерегулярности в изменениях атомных весов, поэтому он призвал коллег направить свои усилия на их уточнение, чем и сам занялся с 1866 года. В связи с переходом на новое место работы ученый отложил свои изыскания в этом направлении, хотя, продолжая работать над новым изданием книги, создал к 1868 г. новую таблицу элементов, в какой-то мере предвосхитившую таблицу

Д.И. Менделеева. В ней Л. Мейер предложил расширенную классификацию пятидесяти двух элементов в пятнадцати вертикальных рядах, шестнадцатый ряд был оставлен пустым. Однако таблица не была опубликована в то время, поскольку Л. Мейер доверил проект своему преемнику, геологу Адольфу Ремеле (1839–1915). В результате и Л. Мейер, и Д.И. Менделеев разработали свои периодические системы в виде двухмерных таблиц независимо друг от друга при написании своих учебных пособий в поиске нового

<sup>4</sup> Его основной целью было устранить противоречия в теориях об атомной массе, атоме, эквивалентности и молекуле и разработать обобщенную химическую теорию.

<sup>5</sup> Сегодня элементы первой таблицы известны как элементы главной группы, а второй – как элементы побочной группы.



дидактического введения в химию элементов.

В конце 1869 года корреспондент журнала *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* Виктор Фон Рихтер (1841–1891) сообщил об интересных взаимосвязях в системе элементов, опубликованной в России Д.И. Менделеевым [5]. Он представил фрагмент самой системы и упомянул также публикацию в *Zeitschrift für Chemie*, в которой описано содержание новаций Д.И. Менделеева – наличие связи между свойствами и атомным весом элементов [6]. Как известно, при переводе русской статьи в последнем журнале главная идея Д.И. Менделеева была искажена: вместо периодичности свойств переводчик написал о ступенчатом изменении свойств [7].

В качестве отклика на это сообщение в 1870 году выходит статья Л. Мейера (рукопись датирована декабрем 1869 г.) под названием “Die Natur der Chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte” («Природа химических элементов как

функция их атомных весов»). График зависимости атомных объемов от атомных весов элементов в ней показывал некоторую периодическую зависимость, о которой Л. Мейер впервые заговорил открыто. Но идею периодичности он несомненно почерпнул в той самой публикации Д.И. Менделеева, которая была с искажениями изложена в указанной выше немецкой периодике. Л. Мейер сам писал в этой статье: «Благодаря более правильному определению атомных весов, сделалось возможным все достаточно известные элементы расположить в одну систему. Недавно Менделеев показал, что подобное расположение можно получить, просто расположив все атомные веса в ряд, без какого-либо произвольного выбора, в порядке их возрастания, затем разбив этот ряд на отрезки и присоединив последние друг к другу без изменения порядка. Следующая таблица в существенных чертах тождественна с той, которую дает Менделеев» (цит. по [8], с. 107).

В этой статье Л. Мейер приводит неозаглавленную таблицу следующего вида (рис. 4) и кривую атомных объемов элементов, которую Д.И. Менделеев в свое время высоко оценил за наглядность.

Его вариант таблицы элементов был очень похож на «Естественную систему» Д.И. Менделеева, опубликованную русским ученым лишь в 1871 году. Как считает историк науки И.С. Дмитриев<sup>6</sup>, «в таблице Мейера четко выявлены будущие главные и допол-

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	B = 11.0	Al = 27.3	—	—	—	In = 113.4	—	Tl = 202.7
	C = 11.97	Si = 28.0	—	—	—	Sn = 117.8	—	Pb = 206.4
			Ti = 48.0		Zr = 89.7		—	
	N = 14.01	P = 30.9		As = 74.9		Sb = 122.1		Bi = 207.5
			V = 51.2		Nb = 93.7		Ta = 182.2	
	O = 15.96	S = 31.98		Se = 78.0		Te = 128 ?		—
			Cr = 52.4		Mo = 95.6		W = 183.5	
—	F = 19.1	Cl = 35.3		Br = 79.75		I = 126.6		—
			Mn = 54.8		Ru = 103.5		Os = 198.6?	
			Fe = 55.9		Rh = 104.1		Ir = 196.7	
		Co =	Ni = 58.6		Pd = 106.2		Pt = 196.7	
Li = 7.01	Na = 22.99	K = 39.04		Rb = 85.2		Cs = 132.7		—
			Cu = 63.3		Ag = 107.66		Au = 196.2	
?Be = 9.3	Mg = 23.9	Ca = 39.9		Sr = 87.0		Ba = 136.8		—
			Zn = 64.9		Cd = 111.6		Hg = 199.8	

Рис. 4. Неозаглавленная таблица элементов Л. Мейера (1870).

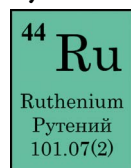
<sup>6</sup> Согласно И.С. Дмитриеву, если мы решаем вопрос «о приоритете на уровне “таблиц”, то тут Мейер, при всех недостатках его системы, имеет веские преимущества. А если говорить об открытии Периодического закона, то приоритет бесспорно за Менделеевым» (Из беседы с И.С. Дмитриевым, состоявшейся в мае 2019 г.).

нительные подгруппы, чего в «Опыте системы элементов...», как прообразе длинной формы системы, не было. Но основной недостаток статьи Мейера состоял в том, что он не увидел за своей таблицей фундаментального закона природы, а потому не решился делать детальные и ясные предсказания свойств неоткрытых к тому времени и исправлять атомные веса известных элементов».

Последовавшие вскоре открытия предсказанных Д.И. Менделеевым химических элементов (1875 г. – галлий, 1880 г. – скандий и др.) подтвердили фундаментальное значение сформулированного ученым Периодического закона. И в 1880-е гг. возник ожесточенный спор о приоритете в его открытии. Он велся некоторое время на страницах журнала *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*.

Спор о приоритете потребовал нового взгляда на результаты десятилетней давности [9, 10]. В частности, Л. Мейер сожалел, что смог представить лишь короткую статью в 1870 году, что сделало невозможным дальнейшее сравнение различных таблиц в деталях. Но в конечном итоге он признал, что Д.И. Менделеев первым упомянул о периодическом изменении свойств, связанное с атомными весами и о возможности предсказания существования еще не известных науке элементов. Именно последнее обстоятельство обусловило триумф закона Д.И. Менделеева и со временем привело к забвению вклада немецкого исследователя, как считают современные историки науки<sup>7</sup>. Хотя в 1882 году обоим исследователям Лондонским королевским обществом была вручена медаль Дэви «за открытие периодической зависимости от атомного веса».

#### Рутений – Ruthenium – Ruthenia – Россия



Еще при жизни Д.И. Менделеева в таблицу химических элементов входил рутений, единственный химический элемент в то время, открытый в России. Этот относящийся к платиновой группе металл открыт Карлом Карловичем Клаусом (1796–1864)<sup>8</sup>,

экстраординарным профессором Казанского университета, в 1844 г. По этому поводу ученый в свое время писал: «Желая ближе познакомиться с платиновыми металлами и приготовить главнейшие их соединения для химического кабинета Казанского университета, я выпросил у господина Соболевского 2 фунта... [заводских платиновых] остатков и в 1841 приступил к делу» [12].

В ходе исследований, используя методы анализа платиновой руды, разработанные Й.Я. Берцелиусом, ученый установил, что в осмистом иридии содержится новый элемент, который он назвал рутений от латинского именования России – *Ruthenia* [13]. Им изучены характерные аналитические реакции нового элемента, получены некоторые его соединения. Используя результаты количественного анализа соли  $K_2RuCl_6$ , К.К. Клаус смог определить атомный вес элемента (104.2, что близко к современному значению 101.07). Соответствующее письмо с сообщением об открытии К.К. Клаус отослал осенью 1844 г. академику Г.И. Гессу. Последний озвучил это открытие на заседаниях Петербургской академии наук в сентябре и октябре того же года. В 1845 году К.К. Клаус издает книгу о своем открытии – «Химическое исследование остатков уральской платиновой руды и металла рутения»<sup>9</sup>, получившую полную (5 тыс. руб.) Демидовскую премию 17 апреля 1846 г. В отзыве на книгу, написанном академиками Г.И. Гессом и Ю.Ф. Фрицше, отмечалось: «Россия, вследствие

<sup>7</sup> Однако хочется заметить, что в зарубежной прессе до сих пор встречаются оценки открытия Периодического закона как некоего совместного и независимого события. Авторами закона и системы считают одновременно Л. Мейера и Д.И. Менделеева. В частности, вот так до настоящего времени характеризуют содержание вышеупомянутой статьи Л. Мейера “Die Natur der Chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte”. Это – «...первое появление в печати... революционной классической статьи, в которой Лотар Мейер... впервые полностью выразил свои идеи о связи между атомным весом элементов и их свойствами – Периодический закон. Этот закон, который был открыт независимо и почти одновременно в 1868–1869 годах немецким химиком Лотаром Мейером и русским химиком Менделеевым, можно сформулировать словами: свойства элементов есть периодическая функция (или периодическое изменение) атомного веса» [11].

<sup>8</sup> К.К. Клаус (рис. 5), балтийский немец родом из Дерпта (ныне Тарту, Эстония), с 1837 г. преподавал в Казанском университете, профессор фармации.

<sup>9</sup> Из спутников рутения Клаус особенно подробно изучил осмий и его соединения ( $OsO_2$ ,  $Os_2O_3$  и др.).



Рис. 5. Портрет Карла Карловича Клауса.

этого открытия, в первый раз пользуется честью водворения в Химии нового простого тела, обретенного в таком отечественном материале, которому и самое учреждение премий некоторым образом обязано своим происхождением» [14]. Позже Д.И. Менделеев, обсуждая открытый им Периодический закон, отмечал также важный вклад К.К. Клауса в установление определенных аналогий свойств в триадах металлов платиновой группы, которые последний изучал («Клаус заметил, что Os, Ir, Pt, имеющие атомный вес около 195, аналогичны с Ru, Rh, Pd, которых атомный вес близок к 105» [15]), что оказалось значимым для систематики элементов до открытия Периодического закона.

Периодическая система еще при жизни Д.И. Менделеева неоднократно видоизменялась в соответствии с новыми научными данными и открытиями. В этом отношении поражает интуиция ее создателя, который в «Основах химии» писал по этому поводу: «Периодический закон не только ждет новых приложений, но и усовершенствований, подробной разработки... <...> По-видимому, Периодическому закону будущее не

грозит разрушением, а только надстройка и развитие обещается» [3].

### Расширение границ Периодической системы. Синтез трансуранов

Действительно, дальнейшее развитие Периодического закона и Периодической системы связано с накапливающимся экспериментальным материалом в области атомной и ядерной физики. Открытие радиоактивности изменило наши представления о Вселенной: атомы уже не рассматривались как неизменные кирпичики мироздания. Было установлено значение атомного номера, который численно соответствовал положительному заряду ядра каждого атома. С введением квантовых чисел Периодическая система обрела теоретическое обоснование.

Дальнейшее развитие ядерной физики в области практического применения ядерных излучений, разработка атомных проектов в СССР и США в 1940-е гг. стали движущей силой создания мирной атомной энергетики. Успехи науки в это время позволили расширить границы Периодической системы за счет синтеза новых элементов – трансурановых (элементы с атомным номером от 93 до 101, 1940–1950-е гг.). После работы американцев – физика Э.М. Макмиллана и химика Ф.Х. Эйблсона, которые, продублировав эксперименты Э. Ферми по получению элементов тяжелее урана, получили первый трансурановый элемент с порядковым номером 93, названный ими нептунием<sup>10</sup>, – этой проблематикой вплотную занялась группа исследователей под руководством известного американского физика Г.Т. Сиборга (1912–1999), работавшая в Беркли (Калифорнийский университет). Уже год спустя Г. Сиборгом с сотрудниками был открыт плутоний (атомный номер 94). И далее за долгие годы работы были синтезированы элементы с порядковыми номерами от 95 до 101. Подобных успехов невозможно было бы добиться без сооружения ускорителей заряженных частиц и атомных реакторов, в которых происходил синтез радиоактивных ядер. Элементы получались в ходе последовательных захватов нейтронов ядрами-мишенями. Но как было установлено, при переходе к элементам с более высоким порядковым номером количественный выход каждого последующего уменьшался. Так, сегодня запасы плутония в мире составляют многие сотни тонн, а калифорний (порядковый номер 98) получен лишь в нескольких граммах.

Синтез менделевия (порядковый номер 101), который получили в начале экспериментов лишь

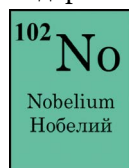
<sup>10</sup> Np был получен бомбардировкой урана нейтронами (1940 г.).

в количестве нескольких атомов<sup>11</sup>, подтвердил заключение ученых о том, что возможности использования для бомбардировки мишеней легких частиц (альфа-частиц,  ${}^4_2\text{He}$ , дейтронов  ${}^2_1\text{H}$ ) исчерпаны. И в 1950-е гг. физики перешли к новым методам синтеза – к реакциям слияния с участием тяжелых ионов ( ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{18}\text{O}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}$  и др.).

### Триумф советской науки: получение элементов с порядковыми номерами 102–105.

Для целей осуществления ядерных реакций на ускоренных тяжелых ионах разработаны специальные ускорители тяжелых ионов, в том числе в 1960 г. создан циклотрон У-300 в Дубне. Институт, на территории которого размещался ускоритель, создан в марте 1956 г. под названием Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)<sup>12</sup>. Уникальный циклотрон сконструирован в Ленинграде на основе концепции, предложенной Г.Н. Флёрвым (рис. 6), возглавившим в институте Лабораторию ядерных реакций (ЛЯР)<sup>13</sup>.

Синтезировавший многие новые элементы и в конечном итоге более четырехсот изотопов, этот институт очень быстро завоевал репутацию мирового лидера в области ядерных исследований [18].



Уже через несколько лет после учреждения института в нем было осуществлено первое открытие в области синтеза новых элементов, а именно: элемент с зарядовым числом 102. Как отмечает в своей публикации В.А. Щёголев, один из авторов этого синтеза, осуществленного в институте в рамках ЛЯР, получение элементов с  $Z \geq 102$  являлось очень сложной экспериментальной задачей. «Образование ядер этих элементов, – пишет исследователь, – происходит в конкуренции с делением составного ядра, в которое вносится большая энергия возбуждения (40–50 МэВ). Поэтому эти реакции были названы “реакциями горячего синтеза”. Например, при синтезе 102-го элемента в реакции  ${}^{238}\text{U}({}^{22}\text{Ne}, 4n){}^{256}\text{No}$  отношение вероятности деления к вероятности получить искомое ядро  ${}^{256}\text{No}$  равно  $\sim 10^8$ . Это означает, что за несколько часов эксперимента можно получить только полтора – два десятка атомов нобелия<sup>14</sup>. Кроме того, в разнообразных реакциях частичного слияния

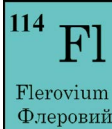
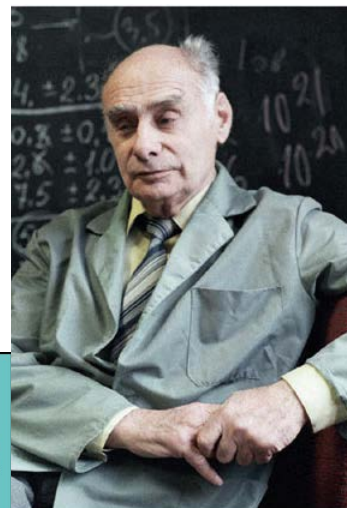


Рис. 6. Георгий Николаевич Флёрв; в честь него назван элемент с  $Z=114$ .

ядра-мишени и бомбардирующей частицы (так называемых реакциях передачи нуклонов) образуются ядра в области Po – Ac с  $Z < 102$ . Вероятность их образования в  $\sim 10^5$  раз превышает вероятность образования искомого ядра...», всё это создает огромный фон, «...из которого нужно выделить эффект радиоактивного распада ядер нового элемента» [19].

Следует заметить, что работами по получению элемента с  $Z \geq 102$  одновременно занимались три группы исследователей. Первая, международная, состояла из участников Института физики в Стокгольме, Национальной лаборатории в Арагоне (Джорджия, США) и учреждения по атомной энергии в Англии. Вторая – Радиационная лаборатория имени Э. Лоуренса в Беркли (США), Г. Сиборг с сотрудниками. И третья – сотрудники ОИЯИ. Первая получила уже в 1957 году изотоп с массовым числом между 251 и 255, вторая в 1958 г. установила образование изотопа с массовым числом 254. Именно объединенная

<sup>11</sup> Впервые  ${}^{256}\text{Md}$  (период полураспада около 1 ч) получили на циклотроне в Беркли (А. Гиорсо, Б. Харви, Г. Шоппен, С. Томсон и Г. Сиборг, 1955) при действии  $\alpha$ -частиц на атомы эйнштейния. Элемент назван в честь творца Периодического закона.

<sup>12</sup> С самого основания институт позиционировался как международная научная организация, объединяющая ученых социалистического лагеря. Соглашение об его организации было подписано в Москве представителями 11 государств [16].

<sup>13</sup> Флёрв Георгий Николаевич (1913–1990), один из основателей ОИЯИ. Неизменный руководитель ЛЯР с 1958 по 1988 г. Академик АН СССР с 1968 г. [17].

<sup>14</sup> Элемент был назван нобелием (см. далее).

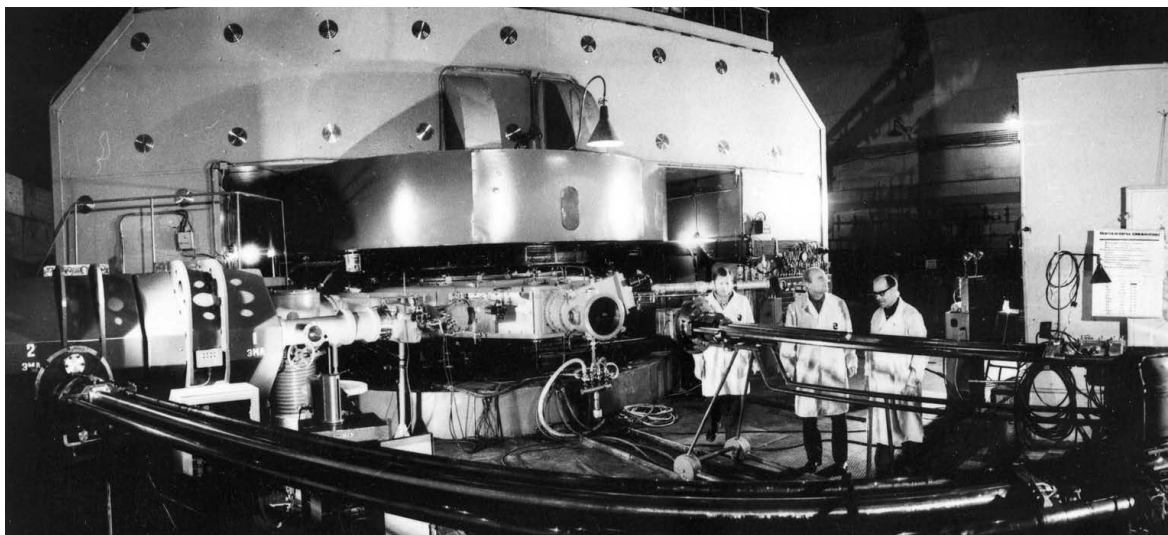
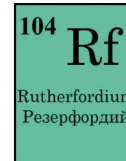
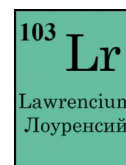


Рис. 7. Циклотрон У-300: первый ускоритель ЛЯР.

шведско-англо-американская группа, работавшая в Стокгольме в Нобелевском институте, первой опубликовала результаты своих работ и назвала элемент нобелием. Однако экспериментальные данные, заявленные этой группой, а затем и группой Г. Сиборга, не подтверждались другими исследователями. В Дубне в 1961 г. с использованием мощностей только что запущенного вышеупомянутого циклотрона (рис. 7) вновь занялись проблемой установления существования элемента с номером 102. В результате группа исследователей (Е.Д. Донец, В.А. Щёголев, В.А. Ермаков) к 1963 году синтезировала изотоп 102-го элемента и провела надежную идентификацию его с массовым числом 256. Открытие советских ученых спровоцировало дальнейшие дебаты по поводу приоритета открытия элемента с  $Z = 102$ , продолжавшиеся не одно десятилетие. Российский приоритет зафиксирован много позднее: в 1990-е гг. Но попытка советских ученых назвать элемент жолитием<sup>15</sup> в честь Ф. Жолио-Кюри потерпела неудачу. За эле-

ментом было закреплено название нобелия (см. [13], стр. 223).

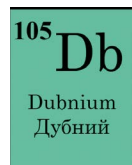
Открытия 103-го и 104-го элементов также сопряжены с ожесточенными дебатами по поводу приоритетных преимуществ. Впервые попытка синтеза элемента 103 осуществлена в Беркли в 1959–1961 гг. (по реакции облучения калифорния ионами бора). Исследователи назвали элемент лоуренсием (Lr) в честь изобретателя циклотрона физика Э. Лоуренса. Однако, как посчитали позже ученые из ОИЯИ, занявшиеся аналогичной проблемой в 1960-е гг., однозначного доказательства факта синтеза американцами не приведено. В 1965 г. группа советских ученых под руководством Г.Н. Флёрва достоверно синтезировала элемент (при бомбардировке америция ионами кислорода) и идентифицировала по  $\alpha$ -распаду его изотопа с массовым числом 256<sup>16</sup>. В результате в 1967 году группе сотрудников ЛЯР в составе: Г.Н. Флёрв (директор лаборатории), доктор химических наук И.И. Звара, кандидаты физико-математических наук В.А. Друин и С.М. Поликанов, была вручена Ленинская премия за синтез и исследование свойств трансурановых элементов. Советские исследователи, однако, не смогли отстоять предложенное ими название для элемента с  $Z = 103$  – резерфордий (в честь нобелевского лауреата Э. Резерфорда, «отца ядерной физики», как его часто



<sup>15</sup> Достаточно длительное время в советской версии таблицы Д.И. Менделеева 102-й элемент значился как жолитий, а в американской и европейской – как нобелий.

<sup>16</sup> Советское достижение было признано как научное открытие и занесено в Государственный реестр открытий СССР под №132 с приоритетом от 20 апреля 1965 г. в следующей формулировке: «Экспериментально обнаружено неизвестное ранее явление образования элемента с атомным номером 103, впервые полученный изотоп которого синтезирован при облучении америция-243 ионами кислорода-18. Имеет массовое число 256, период полураспада 35 с и сложный спектр энергий альфа-частиц в интервале 8.3–8.6 мегаэлектрон-вольт» [20].

именуют). Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC – ИЮПАК) закрепил за элементом название лоуренсий.



В Государственный реестр открытий СССР в 1964 году за №37 был внесен советский приоритет в обнаружении 104-го элемента<sup>17</sup>, для которого было предложено название курчатовий (в честь И.В. Курчатова, известного советского физика-ядерщика). Однако спустя несколько лет американцы посчитали это открытие бездоказательным, поскольку сами синтезировали 104-й элемент (Беркли)<sup>18</sup>. Начался очередной раунд трансфермиевых войн<sup>19</sup>, пришедшийся на период открытия и 105-го элемента. Последний в ОИЯИ синтезирован в 1969 году группой исследователей, в которую входили: академик Г.Н. Флёрв, доктор физико-математических наук Ю.Ц. Оганесян, кандидаты физико-математических наук В.А. Друин, Ю.В. Лобанов и др. В 1970 г. изучены химические и радиоактивные свойства нового элемента. Несколько позже, но в том же 1970 г., элемент получен в Беркли (при облучении мишеней из калифорния ионами азота).

В 1980-е гг. ИЮПАК решил урегулировать проблему приоритета в открытии новых элементов. Совместным с Международным союзом чистой и прикладной физики решением была создана рабочая группа из независимых химиков и физиков для выработки критериев открытия новых химических элементов и определения приоритетов в этой области. Как отмечено в работе [18], в 1995 году признан приоритет Дубны в открытии элементов с  $Z = 102-105$ . В 1997 году 105-му элементу присвоено название «дубний» в знак признания успешной работы лаборатории в Дубне. В том же году вышеуказанной комиссией отмечен большой вклад ОИЯИ в обнаружение элементов с  $Z = 106-108$  (сиборгий, борий, мейтнерий), хотя их первооткрывателями общепризнано считаются научные группы Беркли (США) и Дармштадта (Германия). Однако анализ литературы по данной тематике показывает, что до сих пор существуют разночтения в оценке вклада различных групп исследователей в открытие элементов с  $Z = 102-105$  (к примеру, сравните информацию на известных сайтах *Elementymology & Elements*

*Multidict* (<http://elements.vanderkrogt.net/element.php?num=106>), ОИЯИ (<http://www.jinr.ru/about/>) и сведения, представленные в популярном энциклопедическом издании [13]).

### Достижения группы

#### Ю.Ц. Оганесян: синтез

#### сверхтяжелых элементов 113–118

В 1974 г. в Дубне Ю.Ц. Оганесяном разработан метод «холодного синтеза», использовавшийся успешно исследователями многих стран практически в течение 20 лет для синтеза тяжелых элементов. Обязательным условием этого метода является использование «магических» ядер  $^{208}\text{Pb}$  или  $^{209}\text{Bi}$ . Он позволил исследователям продвинуться в область химических элементов с атомным номером выше 106-го. Для работ в этом направлении в ОИЯИ запущен новый циклотрон (У-400), значительно расширивший экспериментальные возможности исследователей как по «ассортименту» ускоряемых ионов, так и по их физическим характеристикам. Работы по этому методу по синтезу элементов с  $Z > 106$  велись параллельно в Дармштадте и Дубне. Ученые ОИЯИ приняли непосредственное участие в подтверждении существования ряда элементов с порядковыми номерами выше 106-го (например, бория, коперниция и др.).

Однако именно возврат к реакциям горячего синтеза с использованием в качестве бомбардирующих частиц иона  $^{48}\text{Ca}$  привел российских ученых к ряду впечатляющих открытий в области сверхтяжелых элементов. В качестве мишенного материала применяли изотопы актинидов (U, Np, Pu, Am, Cm, Cf). Проведен-

<sup>17</sup> Формула открытия: «Экспериментально обнаружено явление образования элемента с атомным номером 104 при облучении мишени плутония ускоренными ионами неона». Авторы: группа сотрудников под руководством Г.Н. Флёрва [20].

<sup>18</sup> В ноябре 1969 года на конференции в Техасе один из участников американской группы высказал сомнения по поводу корректности данных, полученных дубненской группой по изотопу с массой 260 для 104-го элемента.

<sup>19</sup> Трансфермиевые войны (англ. *transfermium wars*) – устоявшийся термин для обозначения споров между американскими и советскими учеными в 1960–1990-е гг. по поводу приоритета в открытии химических элементов после 100-го.

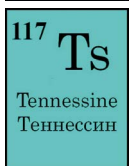
ные эксперименты привели к синтезу шести сверхтяжелых химических элементов в области  $Z = 113-118$ , которые завершили седьмой период Периодической системы Д.И. Менделеева. «В этих исследованиях, – как отмечено авторами этих открытий, – впервые были получены и определены свойства распада ядер свыше 50 новых изотопов элементов 104–118, обладающих большим избытком нейтронов. Они существенно пополнили карту нуклидов и расширили ее до  $Z = 118$ ... Результаты синтеза элементов 112–118, полученные позднее в Дубне, были подтверждены в GSI (GSI – Gesellschaft für Schwerionenforschung, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH) и в LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)» [21].



ИЮПАК по результатам работы совместного с Международным союзом теоретической и прикладной физики комитета утвердил за Дубной приоритет открытия элементов с  $Z = 114-118$ . 114-й элемент – Flerovium (Fl), 116-й элемент – Livermorium (Lv) открыты, соответственно, в 1999 году и 2000 году (коллаборация ОИЯИ с Ливерморской национальной лабораторией, США). Флеровий назван в память академика Г.Н. Флёрова, основателя и заведующего ЛЯР ОИЯИ, которая сегодня носит его имя. В свое время он был признанным лидером в области синтеза трансурановых элементов.



Ливерморий получил это название в честь Ливерморской национальной лаборатории имени Э. Лоуренса, с которой дубнинские ученые плодотворно сотрудничают в области синтеза новых элементов не один десяток лет. 115-й (2003 г.) и 117-й (2009 г.) элементы синтезированы, согласно мнению ИЮПАК,



благодаря долгосрочному сотрудничеству ученых ОИЯИ с двумя американскими лабораториями, всё той же Ливерморской национальной лабораторией и Окриджской национальной лабораторией. Они получили соответствующие названия: 115-й – московий (лат. Moscovium, Mc), в честь Московского региона в целом (Москвы и Московской обл.), именно здесь выполнялись исследования по синтезу элемента, и 117-й – теннессин (лат. Tennessine, Ts), в знак признания вклада штата Теннесси, ряда его научно-исследовательских лабораторий, в том числе Окриджской, в изучение сверхтяжелых элементов. 118-й элемент, получивший название «оганесон» и обозначение Og в честь академика Юрия Цолаковича Оганесяна, научного руководителя ЛЯР им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ, за его новации в исследованиях трансактиноидных элементов, открыт в 2002 году. Приоритет в открытии этого элемента признан за коллаборацией ОИЯИ и Ливерморской национальной лаборатории (США). Оганесон стал вторым (после сиборгия) элементом, названным в честь ученого наших дней, продолжающего активно работать в науке.

В течение нескольких лет исследователи ОИЯИ боролись за признание их приоритета в получении 113-го элемента, который реально зарегистрирован впервые в 2003 году (реакция кальция-48 с америцием-243). Его идентифицировали как дочерний продукт распада изотопа элемента с  $Z = 115$  и массой 288. По этому поводу на сайте ОИЯИ написано [22]: «Чуть позднее (в 2004 г.) нашими коллегами из РИКЕН (Япония) группой профессора К. Морито осуществлен первый эксперимент по облучению мишени висмута-209 ускоренными ионами цинка-70, в котором зарегистрирован изотоп 113-го элемента с массой 278 и временем жизни несколько миллисекунд. В целом эксперимент продолжался более 10 лет и суммарно зарегистрировано всего 4 собы-



Рис. 8. Юрий Цолакович Оганесян; в честь него назван элемент 118.

тия синтеза нового элемента. В то же время в Дубне за этот период зарегистрировано около 100 событий рождения элемента 113, и более того, выполнены пионерские эксперименты по изучению его химических свойств. Факт синтеза изотопа 113 с массой 284 подтвержден в ГСИ (Германия) и Беркли (США)... Мы рады за наших коллег из РИКЕН, тем более что руководитель работ профессор К. Морита в определенной степени ученик Дубны... Однако избранный учеными РИКЕН метод синтеза СТЭ себя полностью исчерпал». И всё же в пресс-релизе ИЮПАК от 30 декабря 2015 года окончательно было заявлено, что открытие этого элемента (нихония) признано за коллаборацией института РИКЕН (Япония).

Дальнейшее развитие исследований по синтезу новых элементов ОИЯИ связывает с организацией при ЛЯР первой в мире «Фабрики Сверхтяжелых Элементов (СТЭ)» на основе запущенного в апреле 2019 г. нового ускорителя тяжелых ионов – циклотрона ДЦ-280, по своим параметрам, по интенсивности превосходящего все подобные установки в мире, что позволит уже в ближайшем будущем приступить

к осуществлению синтезов новых элементов с атомными номерами 119 и 120 и далее, относящихся уже к 8-му периоду Периодической таблицы.

Действительно, синтез 114–118 элементов на границе таблицы Д.И. Менделеева существенно изменил представления научного сообщества о пределах материального космоса, став первым экспериментальным подтверждением существования «островов стабильности» в области сверхтяжелых элементов. Проведенные исследования имеют принципиальное фундаментальное значение не только для ядерной физики, но и химии, являясь очередным подтверждением правомерности основополагающего закона периодичности свойств химических элементов Д.И. Менделеева, его прогностических возможностей.

## Литература

1. **И.С. Дмитриев**  
Человек эпохи перемен: Очерки о Д.И. Менделееве и его времени, РФ, Санкт-Петербург, Химиздат, 2004, 576 с.
2. **Д.И. Менделеев**  
ЖРХО, 1871, 3(3), 25.
3. **Д.И. Менделеев**  
Основы химии Д. Менделеева, профессора Императорского СПб. Университета: в 2-х ч., ч. 2, Российская империя, Санкт-Петербург, Типография тов-ва «Общественная Польза», 1871, 951 с.
4. **D. Mendelejeff**  
Ann. Chem. und Pharm, 1872, VIII Suppl., Bd. 8, H.2, 133.
5. **V. von Richter**  
Ber. Dtsch. Chem. Ges., 1869, 2(1), 552. DOI: 10.1002/cber.186900201222.
6. **D.I. Mendelejeff**  
Z. Chem., 1869, 12, 405.
7. **G. Voeck**  
В Early Responses to the Periodic System, Eds M. Kaji, H. Kragh, G. Pallo, UK, Oxford, Oxford Univ. Press, 2015, pp. 47–74.
8. **Н.А. Физуровский**  
Очерк общей истории химии. Развитие классической химии в XIX столетии, СССР, Москва, Наука, 1979, 477 с.
9. **D. Mendelejeff**  
Ber. Dtsch. Chem. Ges., 1880, 13(2), 1796.  
DOI: 10.1002/cber.188001302136.
10. **L. Meyer**  
Ber. Dtsch. Chem. Ges., 1880, 13(2), 2043.  
DOI: 10.1002/cber.188001302188.
11. **Antiquariat für Medizin-Fritz-Dieter Söhn-MedicusBooks-Marburg.**  
(<https://www.medicusbooks.com/3-Naturwissenschaften/Chemie/Allg-Chemie/Meyer-Lothar-Die-Natur-der-chemischen-Elemente-als-Function-ihrer-Atomgewichte-von-Lothar-Meyer-Hierzu-Tafel-III-pp-354-363-1-gefalt-Taf.:24280.html>).
12. **К.К. Клаус**  
Избранные труды по химии платиновых металлов, СССР, Москва, АН СССР, 1954, 304 с.
13. **В.В. Лукин, М.А. Леенсон, А.А. Дроздов, Н.Ф. Степанов, С.С. Бердоносков**  
Химические элементы: Энциклопедический словарь, РФ, Москва, ООО «Издательство «Энциклопедия», 2019, 384 с.
14. **Г.И. Гесс, Ю.Ф. Фрицше**  
В Пятнадцатое присуждение учрежденных П.Н. Демидовым наград, 17 апреля 1846 г., Российская империя, Санкт-Петербург, Императорская Академия наук, 1846, с. 92.
15. **Д.И. Менделеев**  
Периодический закон: Сер. «Классики науки», под ред. Б.М. Кедрова, СССР, Москва, Изд-во АН СССР, 1958, 830 с.
16. **В.Г. Кадышевский, А.Н. Сисакян**  
УФН, 2006, 176(3), 311. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200603e.0311.
17. **N. Brooks, E. Zaitseva, G.N. Flerov**  
В New Dictionary of Scientific Biography, in 8 Vols, V. 3, Ed. N. Koertge, USA, Detroit, Charles Scribner's Sons, 2008, pp. 33–37.
18. **Дубна – остров стабильности: Очерки по истории Объединенного института ядерных исследований, 1956–2006 гг.,** под общ. ред. В.Г. Кадышевского, А.Н. Сисакяна, Ц. Вылова, РФ, Москва, ИКЦ «Академкнига», 2006, 643 с.  
(<http:// theor.jinr.ru/people/Sissakian/CV/public/2006/Dubna.html>).
19. **В.А. Шёголев**  
В Д.И. Менделеев. Диалог с эпохой: Сб. статей, сост. Н.В. Успенская, РФ, Москва, Изд. «Октопус», 2010, с. 79–103.
20. **Научные открытия России. Государственный реестр открытий СССР: Физика, Радиоактивность.**  
(<http://ross-nauka.narod.ru/04-fizika.html>).
21. **Ю.Ц. Оганесян, С.Н. Дмитриев**  
Успехи химии, 2016, 85(9), 901.
22. **Пресс-релиз Объединенного института ядерных исследований: Открытие новых химических элементов с номерами 113, 115, 117 и 118, ОИЯИ, 6.01.2016.** (<http://www.jinr.ru/posts/otkrytie-novykh-himicheskikh-elementov-s-nomerami-113-115-117-i-118/>).





Fig. 2. Print of the “Natural System of the Elements of D.I. Mendeleev” (1871). Such a table was presented at the beginning of the second part of Mendeleev’s “Principles of Chemistry”.

Fig. 3. Part of the table “Natural System of the Elements of D.I. Mendeleev” with the author’s marks.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	B = 11.0	Al = 27.3		—		In = 113.4		Tl = 202.7
	C = 11.97	Si = 28.0		—		Sn = 117.8		Pb = 206.4
			Ti = 48.0		Zr = 89.7			
	N = 14.01	P = 30.9		As = 74.9		Sb = 122.1		Bi = 207.5
			V = 51.2		Nb = 93.7		Ta = 182.2	
	O = 15.96	S = 31.98		Se = 78.0		Te = 128 ?		
			Cr = 52.4		Mo = 95.6		W = 183.5	
—	F = 19.1	Cl = 35.3		Br = 79.75		I = 126.6		
			Mn = 54.8		Ru = 103.5		Os = 198.6?	
			Fe = 55.9		Rh = 104.1		Ir = 196.7	
		Co =	Ni = 58.6		Pd = 106.2		Pt = 196.7	
Li = 7.01	Na = 22.99	K = 39.04		Rb = 85.2		Cs = 132.7		
			Cu = 63.3		Ag = 107.66		Au = 196.2	
?Be = 9.3	Mg = 23.9	Ca = 39.9		Sr = 87.0		Ba = 136.8		
			Zn = 64.9		Cd = 111.6		Hg = 199.8	

Fig. 4. Untitled table of the elements presented by L. Meyer (1870).



Fig. 5. Portrait of Karl Karlovich Claus.

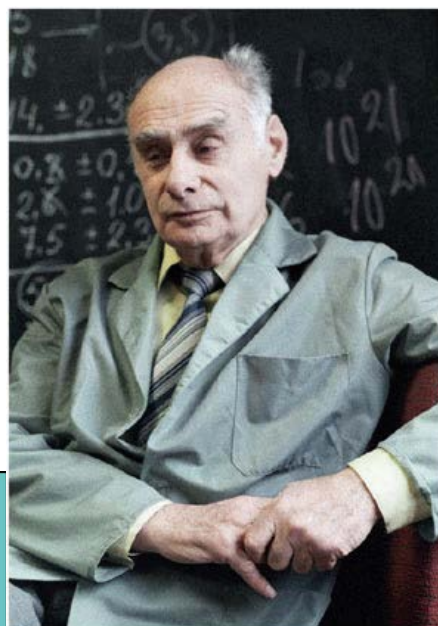


Fig. 6. Georgy Nikolaevich Flerov; the element with atomic number 114 is named after him.

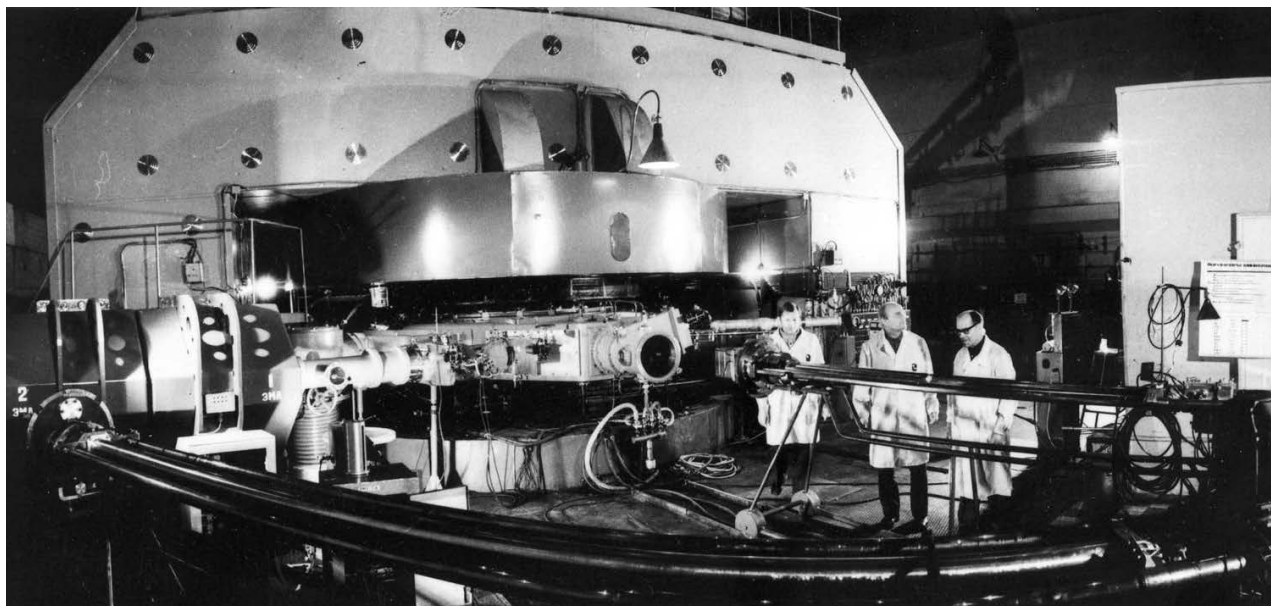
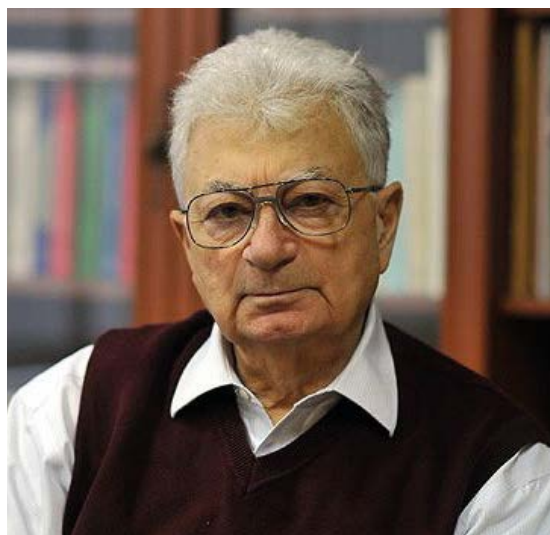


Fig. 7. Cyclotron U-300: the first accelerator of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions.



118  
Og  
Oganesson  
Оганесон

Fig. 8. Yuri Tsolakovich Oganessian; the element with atomic number 118 is named after him.

## References

1. **I.S. Dmitriev**  
*Man of the Epoch of Change: Essays on D.I. Mendeleev and His Time, [Chelovek epokhi peremen: Ocherki o D.I. Mendeleev i ego vremeni]*, RF, St. Petersburg, Himizdat Publ., 2004, 576 pp. (in Russian).
2. **D.I. Mendeleev**  
*J. Rus. Chem. Soc. [Zhurnal Russkogo khimicheskogo obshchestva]*, 1871, 3(3), 25 (in Russian).
3. **D.I. Mendeleev**  
*Mendeleev's Principles of Chemistry, Professor of Imperial St. Petersburg University, In 2 Parts, Part 2, [Osnovy khimii D. Mendeleeva, professora Imperatorskogo SPb. Universiteta]*, Russian Empire, Saint Petersburg, "Obshchestvennaya Polza" Publ., 1871, 951 pp. (in Russian).
4. **D. Mendelejeff**  
*Ann. Chem. und Pharm.*, 1872, VIII Suppl., Bd. 8, H.2, 133.
5. **V. von Richter**  
*Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 1869, 2(1), 552. DOI: 10.1002/cber.186900201222.
6. **D.I. Mendelejeff**  
*Z. Chem.*, 1869, 12, 405.
7. **G.Boeck**  
*In Early Responses to the Periodic System*, Eds M. Kaji, H. Kragh, G. Pallo, UK, Oxford, Oxford Univ. Press, 2015, pp. 47–74.
8. **N.A.Figurovsky**  
*Summary of the General History of Chemistry: The Development of Classical Chemistry in the XIX Century [Ocherk obshchey istorii khimii. Razvitiye klassicheskoy khimii v XIX stoletii]*, USSR, Moscow, "Nauka" Publ., 1979, 477 pp. (in Russian).
9. **D. Mendelejeff**  
*Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 1880, 13(2), 1796. DOI: 10.1002/cber.188001302136.
10. **L. Meyer**  
*Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 1880, 13(2), 2043. DOI: 10.1002/cber.188001302188.
11. *Antiquariat für Medizin-Fritz-Dieter Söhn-MedicusBooks-Marburg*. (<https://www.medicusbooks.com/3-Naturwissenschaften/Chemie/Allg-Chemie/Meyer-Lothar-Die-Natur-der-chemischen-Elemente-als-Funktion-ihrer-Atomgewichte-von-Lothar-Meyer-Hierzu-Tafel-III-pp-354-363-1-gefalt-Taf.:24280.html>).
12. **K.K. Claus**  
*Selected Works on Platinum Metals Chemistry [Izbrannye trudy po khimii platinovykh metallov]*, USSR, Moscow, USSR AS Publ., 1954, 304 pp. (in Russian).
13. **V.V. Lunin, M.A. Leenson, A.A. Drozdov, N.F. Stepanov, S.S. Berdonosov**  
*Chemical Elements: Encyclopedic Dictionary, [Khimicheskie elementy:*

- Entsiklopedichesky slovar*], RF, Moscow, ООО “Encyclopedia Publishing” Publ., 2019, 384 pp. (in Russian).
14. **G.I. Hess, Yu.F. Fritzsche**  
In *The Fifteenth Awarding of Prizes Established by P.N. Demidov, April 17, 1846* [Pyatnadsatoe prisuzhdenie uchrezhdennykh P.N. Demidovym nagrad, 17 aprelya 1846 g.], Russian Empire, Saint Petersburg, Imperial Academy of Sciences Publ., 1846, p. 92 (in Russian).
  15. **D.I. Mendeleev**  
*Periodic Law: Ser. “Classics of Science”* [Periodichesky zakon: Ser. «Klassiki nauki»], Ed. B.M. Kedrov, USSR, Moscow, USSR AS Publ., 1958, 830 pp. (in Russian).
  16. **V.G. Kadyshvskii, A.N. Sissakian**  
*Phys. Usp.*, 2006, **49**(3), 297. DOI: 10.1070/PU2006v049n03ABEH005954.
  17. **N. Brooks, E. Zaitseva, G.N. Flerov**  
In *New Dictionary of Scientific Biography*, in 8 Vols, Vol. 3, Ed. N. Koertge, USA, Detroit, Charles Scribner’s Sons, 2008, pp. 33–37.
  18. *Dubna is an Island of Stability. Essays on the History of the Joint Institute for Nuclear Research, 1956–2006* [Dubna – ostrov stabilnosti: Ocherki po istorii Obedinennogo instituta yadernykh issledovaniy, 1956–2006 gg.], Eds V.G. Kadyshvskiy, A.N. Sisakyan, C. Vylov, RF, Moscow, Akademkniga Publ., 2006, 643 pp. (in Russian).
  19. **V.A. Shchegolev**  
In *Proc. D.I. Mendeleev. Dialogue with the Epoch* [D.I. Mendeleev. Dialog s epokhoj: Sb. statej], Comp. N.V. Uspenskaya, RF, Moscow, “Octopus” Publ., 2010, pp. 79–103 (in Russian).
  20. *Scientific Discoveries of Russia. State Register of Discoveries of the USSR: Physics, Radioactivity* [Nauchnye otkrytiya Rossii. Gosudarstvennyy reyestr otkryty SSSR: Fizika, Radioaktivnost]. (<http://ross-nauka.narod.ru/04-fizika.html>) (in Russian).
  21. **Yu. Ts. Oganessian, S.N. Dmitriev**  
*Russ. Chem. Rev.*, 2016, **85**(9), 901. DOI: 10.1070/RCR4607.
  22. *Press Release of the Joint Institute for Nuclear Research: Discovery of New Chemical Elements with the Numbers 113, 115, 117 and 118* [Press-reliz Obedinennogo instituta yadernykh issledovany: Otkrytie novykh khimicheskikh elementov s nomerami 113, 115, 117 i 118], JINR, 6.01.2016. (<http://www.jinr.ru/posts/otkrytie-novyh-himicheskikh-elementov-s-nomerami-113-115-117-i-118/>) (in Russian).

## Звезды от колыбели до могилы – мощнейшие фабрики химических элементов

А.А. Лутовинов

Первые элементы Периодической таблицы – водород, гелий и частично литий – появились в первые секунды после рождения Вселенной. Из них «собрались» первые звезды – естественные фабрики синтеза более тяжелых элементов не только на протяжении своей жизни, но и даже во время гибели, во время вспышек сверхновых. Вспышки сверхновых, в свою очередь, являются мощнейшими фабриками по производству тяжелых элементов. Современные инструменты позволяют не только регистрировать такие события, но и определять, сколько образовалось разных химических элементов во время таких событий. Недавнее открытие слияния нейтронных звезд и последующие исследования их послесвечения позволили установить процесс образования во Вселенной сверхтяжелых элементов вплоть до золота и урана. Таким образом, именно астрофизические наблюдения дают ученым важнейшую информацию о «темпах производства» элементов в природе, их обилию во Вселенной.

**Ключевые слова:** звезды, эволюция, термоядерное горение, сверхновые, слияния нейтронных звезд.

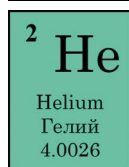
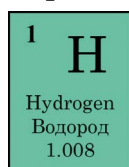
...We are made of star stuff.

*Carl Sagan, astrophysicist*

...Все мы состоим из звездной пыли.

*Карл Саган, астрофизик*

### Образование химических элементов в звездах



Сразу после Большого взрыва, примерно 14 миллиардов лет назад, во Вселенной не было ни звезд, ни галактик. Чтобы смогли образоваться первые космические объекты, горячему газу необходимо было остыть. Этот процесс занял несколько сотен миллионов лет, прежде чем самые первые звезды вспыхнули во Вселенной, которая в то время состояла только из водорода и гелия. Более тяжелые элементы еще не образовались. Согласно нашим представлениям о химических процессах, происходящих в газе, и механизмах его охлаждения, первые звезды должны были быть очень массивными. Недавние вычисления показывают, что они могли иметь массу, в сто раз превышающую массу Солнца. Для сравнения: большинство современных звезд являются маломассивными объектами с массами, сравнимыми или меньше солнечной. Звезды загораются в результате ядерного синтеза, который происходит в их недрах. Именно он является источником энергии, который поддерживает их огром-

ную светимость. В самой первой, самой длинной фазе горения водорода образуется гелий. В результате ядерной реакции четыре протона (или ядра водорода) сливаются, образуя ядро гелия. На последующей стадии горения, которая составляет только последние десять процентов жизни звезд, два ядра гелия (« $\alpha$ -частицы») превращаются в бериллий, который затем захватывает другую  $\alpha$ -частицу, превращаясь в углерод в так называемом тройном  $\alpha$ -процессе. Посредством дополнительных захватов  $\alpha$ -частиц ядра углерода превращаются в кислород. Таким образом, в результате процессов нуклеосинтеза создаются все элементы Периодической таблицы, вплоть до железа [1, 2].

Слияние более легких элементов в более тяжелые приводит к преобразованию небольшого количества



**ЛУТОВИНОВ**

**Александр Анатольевич**

профессор,

Институт космических исследований РАН

массы в энергию. Например, ядро гелия на 0.7 процента легче, чем четыре отдельных ядра водорода. Именно эта разница в массе согласно закону  $E = mc^2$  поддерживает светимость звезды в течение длительного периода времени. Однако, как только в центре звезды образуется железное ядро, нуклеосинтез прекращается, так как железо имеет наибольшую энергию связи в пересчете на один нуклон. Становится невозможным получение энергии путем дальнейших ядерных реакций, и, таким образом, звезда лишается источника энергии, необходимого для ее существования. Как следствие, звезда больше не может поддерживать состояние равновесия и начинает разрушаться под действием собственной гравитации. В результате возникающего огромного давления железное ядро превращается в крайне плотную нейтронную звезду (более подробно см. ниже), а с самой звездой происходит коллапс, сопровождающийся гигантской вспышкой сверхновой. Такова была судьба самых первых массивных звезд, и такова судьба массивных звезд и в наши дни.

Для поддержания своей огромной светимости массивным звездам – с массами в несколько десятков или сотен масс Солнца – требуется значительное количество ядерной энергии. Водород прогорает в них существенно быстрее, чем у звезд с меньшей массой. Поэтому время их жизни ограничено всего несколькими миллионами или десятками миллионов лет, в то время как жизнь маломассивных звезд длится миллиарды лет.

Во время взрыва сверхновой все образовавшиеся элементы попадают в межзвездную среду. Смерть первых звезд стала важной вехой в эволюции Вселенной, приведя к ее «загрязнению» углеродом, кислородом, азотом, железом и другими элементами. Таким образом, со временем Вселенная все больше и больше обогащалась элементами, более тяжелыми, чем водород и гелий, которые астро-

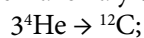
номы называют «металлами». Все звезды в последующих поколениях формировались из газовых облаков, содержащих металлы, которые были получены, по крайней мере, от одного поколения звезд, взрывающихся в виде сверхновых. Появление металлов в ранней Вселенной изменило условия для последующего звездообразования. Облака газа стали охлаждаться более эффективно в присутствии металлов или пыли, что привело к возможностям коллапса более мелких облаков и, следовательно, к образованию звезд меньших масс.

На самых ранних этапах развития Вселенной массивные звезды, взрывающиеся в виде сверхновых, доминировали в производстве железа во Вселенной. Однако ситуация изменилась примерно через миллиард лет. Вследствие образования звезд с более низкими массами и более долгим временем жизни возник другой путь производства железа. В конце своей долгой жизни звезды с малой массой превращаются в белые карлики (объекты, состоящие практически полностью из углерода с небольшой примесью кислорода и, возможно, неона, имеющие радиус в несколько тысяч километров и предельно возможную массу, составляющую 1.4 массы Солнца – так называемый предел Чандрасекара). Если обычная звезда и белый карлик находятся в двойной системе и существует перетекание достаточного количества вещества от звезды к белому карлику, то масса последнего в какой-то момент может превысить предел Чандрасекара, что приведет к коллапсу белого карлика и термоядерному взрыву – вспыхнет сверхновая типа Ia. Учитывая преобладание звезд малой массы в современной Вселенной, считается, что железо в основном производится именно этим процессом, а не взрывом массивных звезд, как это было в ранней Вселенной (более подробно про регистрацию вспышек сверхновых и определение обилия производимых элементов см. ниже). Схематически эволюция звезд разных масс показана на *рис. 1*.

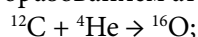
Таким образом, как уже было сказано выше, все элементы, вплоть до железа, создаются путем ядерного синтеза в течение жизни звезд.

Например, возможны следующие реакции горения гелия:

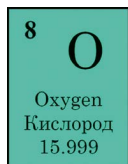
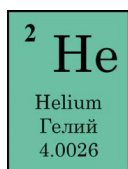
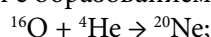
3 атома гелия, сливающиеся с образованием атома углерода:



атом углерода и атом гелия, сливающиеся с образованием атома кислорода:



атом кислорода и атом гелия, сливающиеся с образованием атома неона:



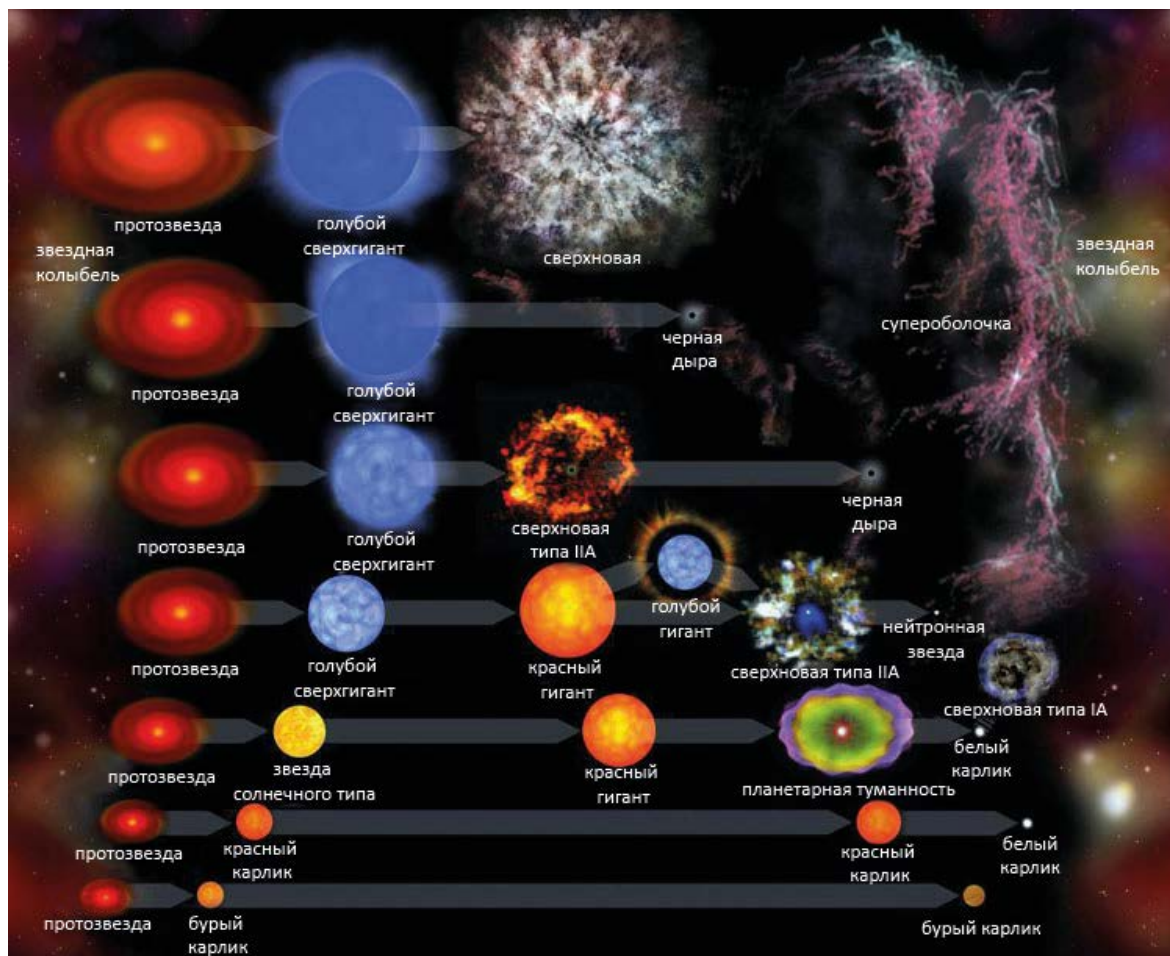
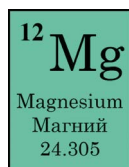
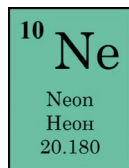


Рис. 1. Разные стадии эволюции звезд в зависимости от их начальных масс. (Фото: NASA / CXC / M. Weiss).



атом неона и атом гелия, сливающиеся с образованием атома магния:  
 $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$ ; и т.д.



Но эти элементы (с атомным номером  $Z < 30$ ) составляют менее трети Периодической таблицы. Откуда же берутся другие элементы с более высокими атомными массами, такие как серебро ( $Z = 47$ ) и золото ( $Z = 79$ ), или более экзотические редкоземельные элементы, такие как лантан ( $Z = 57$ ) и европий ( $Z = 63$ )?

Как мы теперь знаем из ядерной физики, элементы, более тяжелые, чем железо, создаются не посредством процессов синтеза, а посредством захвата нейтронов затравочными ядрами (например, ядрами железа). Однако известно, что нейтрон нестабилен и подвержен так называемому  $\beta$ -распаду ( $\beta$ -распад – это самопроизвольный распад одного элемента на другой посредством преобразования нейтрона в протон, сопровождаемый испусканием электрона и антинейтрино), поэтому образовать новое ядро, новый элемент захватом только одного нейтрона невозможно. Тем не менее, если среда сильно обогащена нейтронами, то затравочное ядро может успеть захватить несколько нейтронов, прежде чем один

из них распадется, и тогда возможно образование нового стабильного ядра с большим атомным номером.

Считается, что такие условия могут возникать при определенных видах взрывов сверхновых. Например, если ядра железа чрезвычайно быстро бомбардируются большим количеством нейтронов до  $\beta$ -распада ядер, их ядра захватывают больше нейтронов, создавая тяжелые, богатые нейтронами и нестабильные изотопы, которые потом превращаются в новые и более тяжелые элементы. Из-за быстрой бомбардировки этот процесс называется  $r$ -процессом. Приблизительно половина всех стабильных изотопов элементов, более тяжелых, чем цинк, производится таким образом. На рис. 2 показан пример процесса образования стабильного изотопа кобальта из атома железа.

Другая часть изотопов тяжелых элементов создается в так называемом



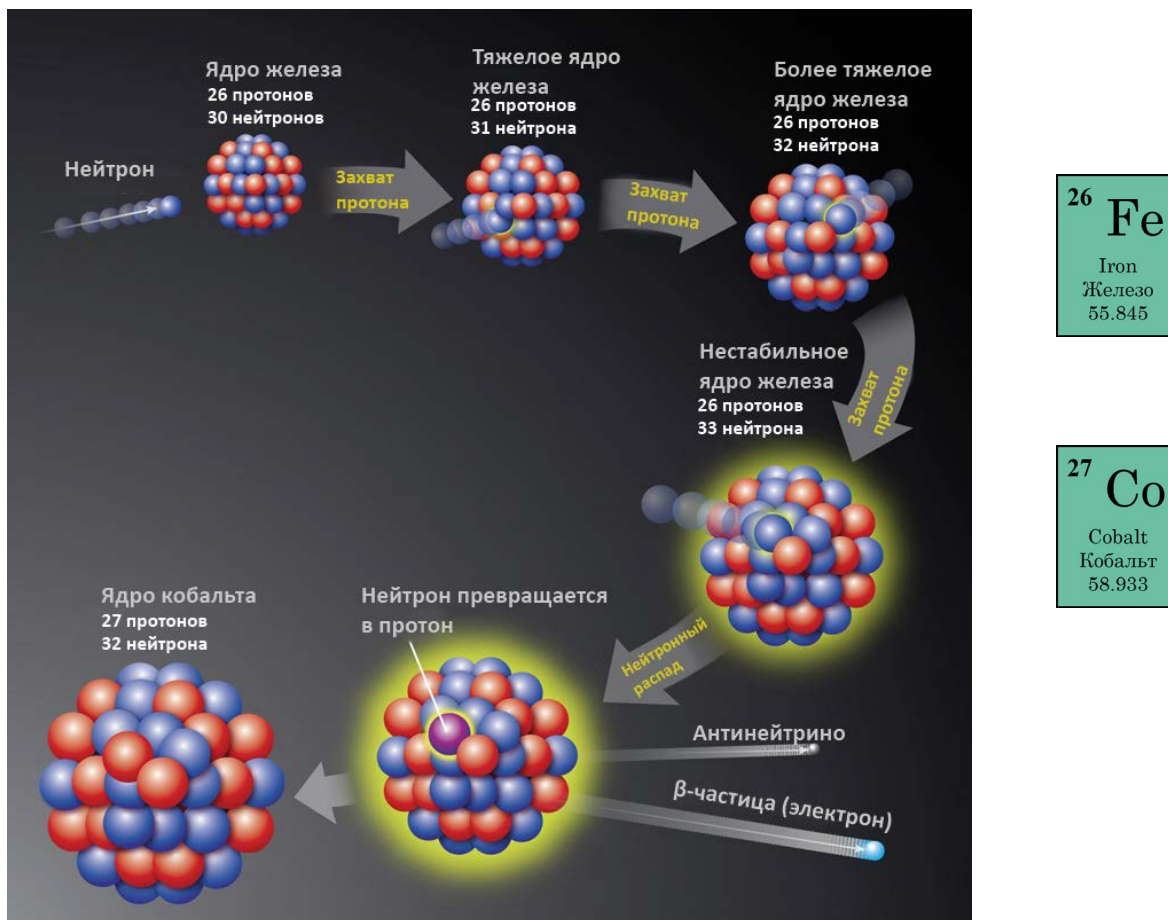


Рис. 2. Процесс образования стабильного изотопа кобальта из атома железа путем захвата нескольких нейтронов. (Фото: Astronomy Magazine).

мом  $s$ -процессе, где более медленная нейтронная бомбардировка (в течение более длительного периода времени, чем процесс  $\beta$ -распада) приводит к последовательному накоплению тяжелых элементов. Этот процесс происходит в пульсирующих внешних оболочках звезд – красных гигантов с массами менее восьми солнечных масс и высокой металличностью  $[\text{Fe}/\text{H}] > -3,0$  [2]. Последнее указывает на то, что звезда образовалась из газа, уже содержащего небольшое количество атомов железа, которые могут играть роль затравочных ядер. Благодаря звездному ветру эти элементы в конечном итоге попадают в межзвездную среду.

Ниже на примерах наблюдений вспышек сверхновых и слияний нейтронных звезд расскажем о том, как непосредственно регистрируются процессы нуклеосинтеза тяжелых элементов в космосе.

### Наблюдения сверхновых в $\gamma$ -лучах – прямые измерения количества образовавшихся элементов

Взрыв сверхновой – финальная стадия существования звезды, при которой ее ядро коллапсирует под собственным весом, и выделившаяся в результате коллапса энергия «разметает» по пространству внешнюю оболочку, тем самым выбрасывая наружу синтезированные в ходе жизни звезды элементы. Именно сверхновые, обогатившие межзвездную среду кремнием, кальцием, железом, другими элементами, сделали в конечном счете возможным образование планет земного типа и зарождение жизни. Однако, несмотря на множество косвенных, прямых подтверждений этой концепции не так много. Среди наиболее убедительных – регистрация оптического, рентгеновского и  $\gamma$ -излучения от радиоактивного распада кобальта  $^{56}\text{Co}$  в железо  $^{56}\text{Fe}$  в остатке Сверхновой звезды SN1987A в Большом Магеллановом Облаке, свет вспышки которой достиг Земли 32 года назад, в 1987 г. Она стала единственной близкой (160 тысяч световых лет) и яркой сверхновой, наблюдавшейся человечеством за последние 450 лет. Наблюдения

 $^{14}\text{Si}$   
 Silicon  
 Кремний  
 28.085
 
 $^{20}\text{Ca}$   
 Calcium  
 Кальций  
 40.078

28 Ni  
Nickel  
Никель  
58.693

27 Co  
Cobalt  
Кобальт  
58.933

26 Fe  
Iron  
Железо  
55.845

этой Сверхновой стали приоритетными в ранней программе советской обсерватории РЕНТГЕН, установленной на модуле КВАНТ орбитальной станции МИР и запущенной на орбиту в марте того же года. Дело в том, что оболочка, образовавшаяся при взрыве звезды с общей массой более 15 солнечных масс, сначала является настолько плотной, что полностью задерживает рентгеновские лучи. Но, поскольку оболочка разлетается во все стороны с огромными скоростями, она постепенно становится прозрачной для рентгеновских и  $\gamma$ -лучей. После взрыва происходит цепочка распадов: образовавшийся никель превращается в кобальт, который затем распадается в железо ( $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ). Как показывали теоретические расчеты,  $\gamma$ -излучение, обусловленное распадом радиоактивного кобальта  $^{56}\text{Co}$ , образовавшегося во время взрыва, должно выходить наружу сквозь расширяющуюся оболочку примерно через полгода после взрыва. И вот, 10 августа 1987 г. приборы обсерватории впервые зарегистрировали жесткое рентгеновское излучение из области Сверхновой. Было пока-

зано, что излучение действительно идет от Сверхновой, произведено с высокой точностью измерение ее спектра в широком диапазоне энергий (рис. 3, [3]), подтвердившее сделанные теоретические расчеты. Таким образом, впервые с помощью данных наблюдений были получены оценки количества произведенных во время вспышки сверхновой радиоактивного никеля и кобальта.

Спустя 25 лет Сверхновая SN1987A вновь подарила российским ученым открытие. На этот раз от остатка вспышки Сверхновой удалось зарегистрировать излучение в линиях распада радиоактивного титана  $^{44}\text{Ti}$ . Считается, что распад радиоактивного  $^{44}\text{Ti}$  дает энергию для инфракрасного, оптического и ультрафиолетового излучения остатка сверхновой после полного распада радиоактивных  $^{56}\text{Co}$  и  $^{57}\text{Co}$  (изотопов, обеспечивающих энергетику остатка звезды в первые три-четыре

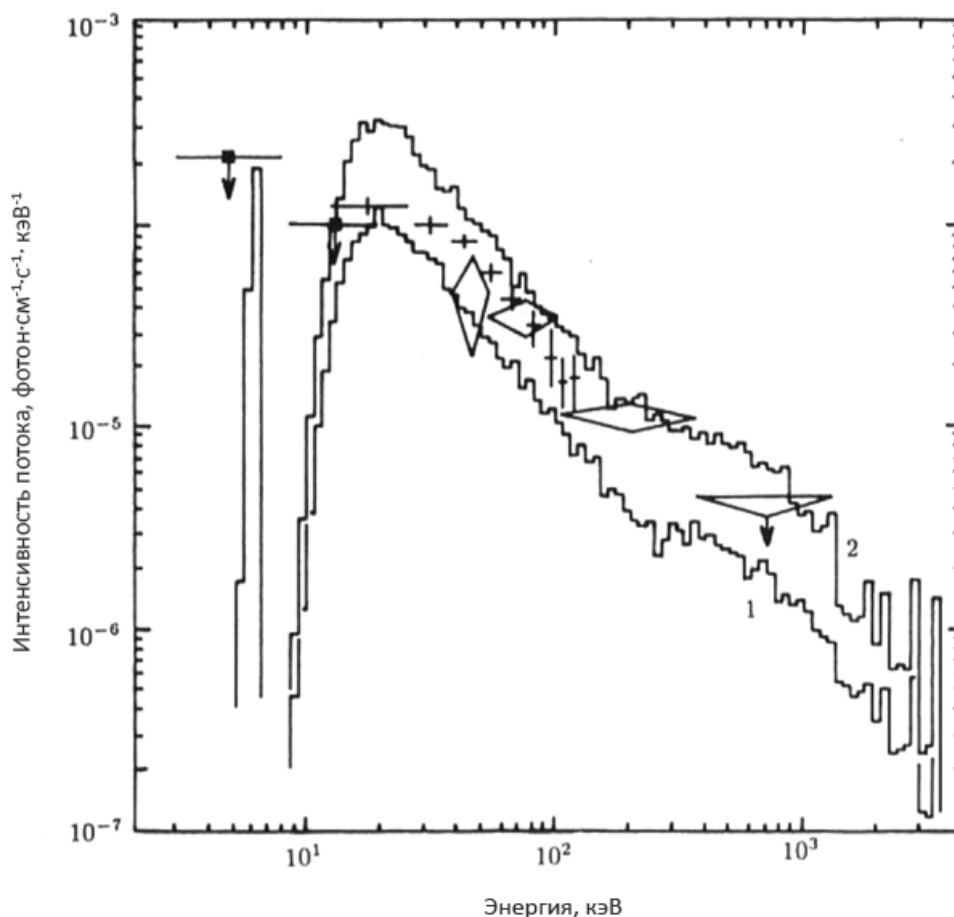


Рис. 3. Спектр Сверхновой SN1987A, измеренный обсерваторией РЕНТГЕН (крестики, ромбы). Гистограмма показывает результаты теоретических предсказаний [3].

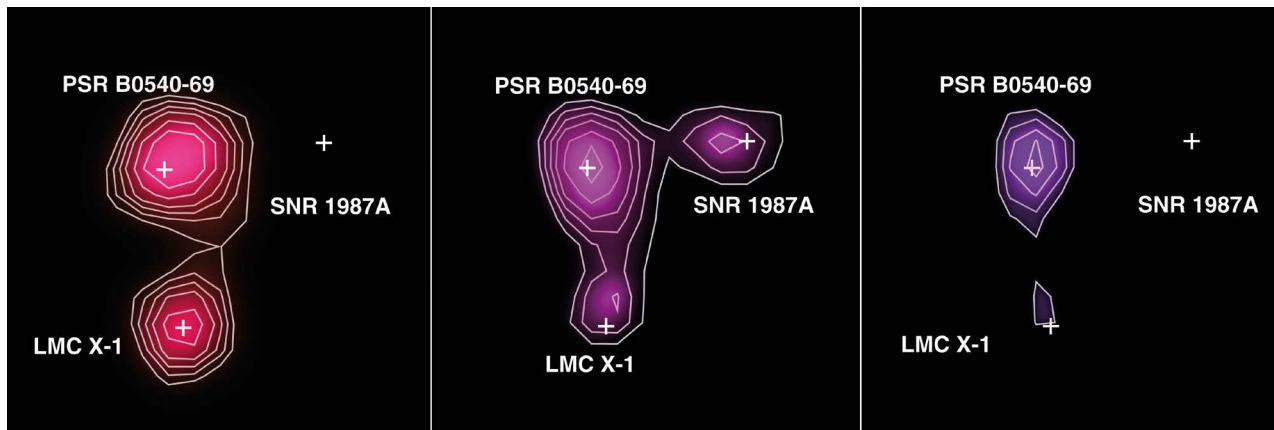
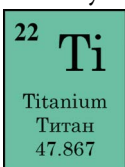


Рис. 4. Изображения участка неба, содержащего остаток вспышки Сверхновой SN1987A, полученные обсерваторией ИНТЕГРАЛ в разных энергетических диапазонах. Средняя панель соответствует диапазону энергий 65–82 кэВ, включающего обе линии распада радиоактивного титана  $^{44}\text{Ti}$ . Из работы [4] и с сайта Европейского космического агентства (ЕКА).

года после взрыва) и до начала активного взаимодействия разлетающейся оболочки с окружающей средой.

Результат был получен на основе сверхдолгих наблюдений Большого Магелланова Облака орбитальной обсерваторией ИНТЕГРАЛ в 2003–2011 гг. с полной экспозицией более шести миллионов секунд, позволившей зарегистрировать жесткое рентгеновское излучение от этого остатка в линиях радиоактивного распада  $^{44}\text{Ti}$  на энергиях 67.9 и 78.4 килоэлектрон-вольт (рис. 4, [4]). Это было первое прямое доказательство образования титана в момент взрыва этой уникальной Сверхновой. Измеренные потоки излучения на этих энергиях соответствуют массе синтезированного  $^{44}\text{Ti}$ , равной около 0.0002 массы Солнца, вполне достаточной для объяснения ее оптического и ультрафиолетового излучения, наблюдавшегося в течение последних 20 лет. Более того, распадаясь с периодом полураспада 59 лет в радиоактивный скандий  $^{44}\text{Sc}$ , а затем практически мгновенно в обычный кальций  $^{44}\text{Ca}$ , титан  $^{44}\text{Ti}$  в этой самой большой в локальном объеме Вселенной действующей «мертвой зоне» остатков термоядерного взрыва еще долго будет оставаться активным, обеспечивая мощное излучение в широком диапазоне электромагнитного спектра [4].



Если Сверхновая SN1987A относилась к так называемым сверхновым II типа (образующихся в результате коллапса массивной звезды, которая уже сильно проэволюционировала) и в ее недрах в результате реакций термоядерного горения образовались многие тяжелые элементы, то для сверхновых типа Ia ситуация была не столь очевидной вплоть до последнего времени.

Как уже отмечалось выше, считается, что сверхновые типа Ia являются результатом термоядерного взрыва углеродно-кислородного белого карлика, в процессе которого синтезируется большое количество радиоактивного никеля  $^{56}\text{Ni}$ . После взрыва происходит та же цепочка распадов, что и описанная выше при коллапсе массивной звезды: радиоактивный никель превращается в кобальт  $^{56}\text{Co}$ , который затем распадается в железо, в ходе чего рождаются многочисленные  $\gamma$ -фотоны. Они взаимодействуют с расширяющейся оболочкой сверхновой, нагревают ее и обеспечивают мощное оптическое свечение оболочки. Схема распада никеля в кобальт и дальше в железо с указанием энергии наиболее ярких  $\gamma$ -линий и характерных времен полураспада показана на рис. 5.

Именно яркость и предсказуемое поведение оптических кривых блеска подарили сверхновым типа Ia название «стандартные свечи», которые используют для вычисления расстояний между объектами во Вселенной.

Однако, хотя уже были открыты сотни таких сверхновых в разных галактиках, их  $\gamma$ -излучение ни разу не было зарегистрировано. В результате исследователи имели дело лишь с оптическим излучением – результатом переработки  $\gamma$ -лучей во внешних слоях разлетающейся оболочки. За всю космическую эру, то есть более полувека, не произошло ни одного взрыва сверхновой типа Ia ни в одной из ближайших к нам галактик. И вот это случилось

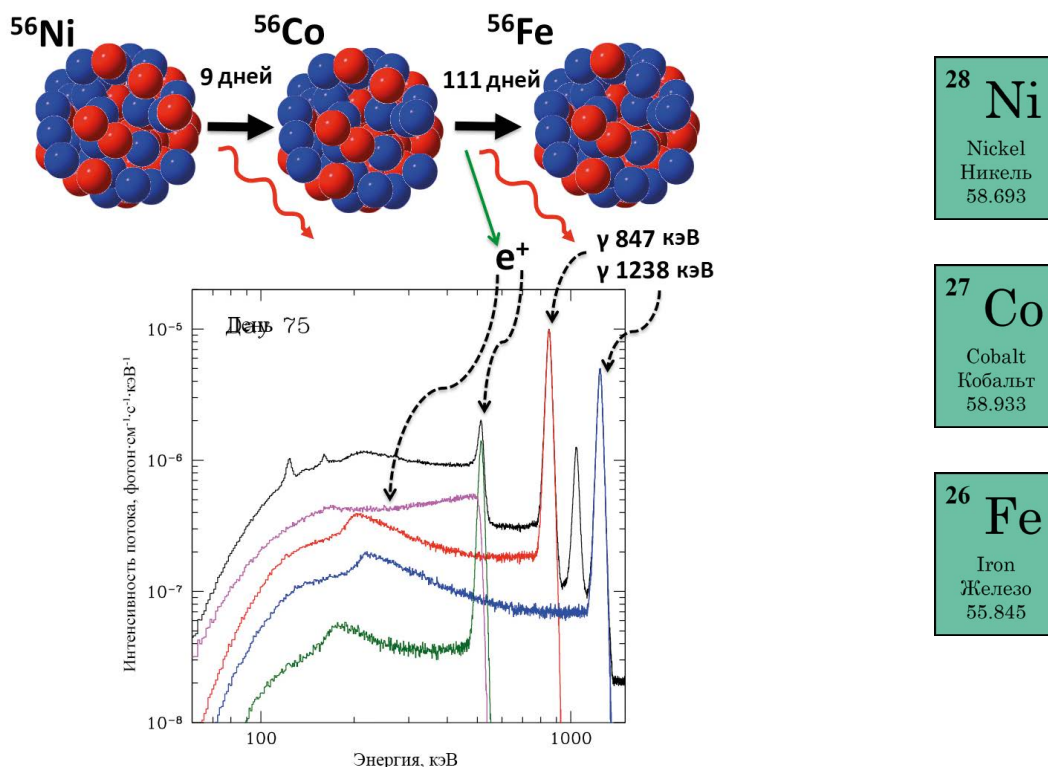


Рис. 5. Схема распада радиоактивного никеля  $^{56}\text{Ni}$  в кобальт  $^{56}\text{Co}$  и дальше в железо  $^{56}\text{Fe}$  с указанием энергии наиболее ярких  $\gamma$ -линий и характерных времен полураспада. (Фото: Институт космических исследований (ИКИ) РАН / Е. Чуразов, см. также [5]).

в январе 2014 года в виде Сверхновой SN2014J в галактике M82.

Она оказалась достаточно близко (11 млн световых лет), чтобы орбитальная обсерватория ИНТЕГРАЛ смогла впервые напрямую обнаружить излучение в двух самых ярких  $\gamma$ -линиях и полностью подтвердить теоретическую концепцию сверхновых типа Ia как гигантских термоядерных взрывов.

Важность этого события не только в том, что подтвердились теоретические предсказания. Несмотря на долгую историю наблюдений и численных экспериментов, детальная физика взрывов сверхновых типа Ia и эволюция компактной звезды-предшественника до взрыва остается предметом дискуссий. После взрыва  $\gamma$ -фотоны, порожденные распадом никеля и кобальта, распространяются через вещество оболочки и теряют свою энергию в результате комптоновского рассеяния и эффекта отдачи. Никель  $^{56}\text{Ni}$  распадается в кобальт  $^{56}\text{Co}$  всего за десять дней. В это время вещество сверхновой еще непрозрачно для  $\gamma$ -квантов, и только излучение радиоактивного никеля, расположенного во внешней части разлетающейся оболочки, имеет шанс выйти за ее пределы. Последующий распад кобальта  $^{56}\text{Co}$  в железо  $^{56}\text{Fe}$  занимает гораздо больше времени (~111 дней), и к моменту, когда расширяющаяся оболочка становится почти прозрачной, кобальт  $^{56}\text{Co}$  доминирует, превращая сверхновую типа Ia в долгоживущий источник  $\gamma$ -линий кобальта [5].

Наблюдения обсерватории INTEGRAL между 50-м и 100-м днями с момента обнаружения взрыва надежно зарегистрировали излучение в двух наиболее мощных  $\gamma$ -линиях распада радиоактивного кобальта  $^{56}\text{Co}$  на энергиях 847 и 1237 кэВ, а также континуум на энергии в сотни кэВ (рис. 6). Зафиксированный поток свидетельствует, что радиоактивного никеля в процессе термоядерного взрыва звезды было синтезировано около 0.6 массы Солнца. Наблюдаемая ширина линий говорит о том, что характерная скорость разлета вещества сверхновой составляет около 10 000 км/с. Все эти параметры неплохо согласуются с предсказаниями самых простых сценариев эволюции белого карлика: взрыв происходит в результате постепенного повышения его массы вплоть до чандрасекаровского предела в 1.4 массы Солнца [5]. Однако и сценарий слияния двух белых карликов тоже исключить нельзя.

Современные инструменты позволяют не только регистрировать процессы рождения новых элемен-

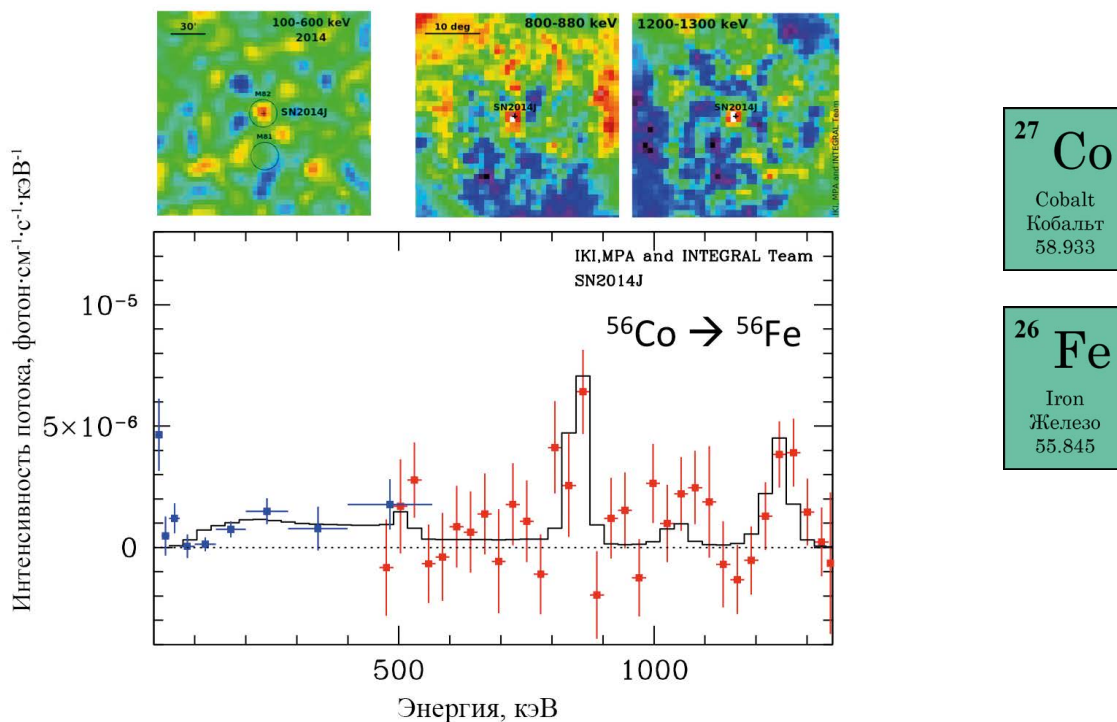


Рис. 6. Наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ Сверхновой SN2014J. (Фото: ИКИ РАН / Е. Чуразов, см. также [5]).

тов во время вспышек сверхновых, определять их обилие, но и строить карты распределения разных элементов в остатках таких вспышек, что позволяет заглянуть на сотни лет

назад и понять механизмы произошедших взрывов и оценить количество образовавшихся химических элементов.

На рис. 7 показано изображение остатка вспышки Сверхновой Cas A, который представляет собой

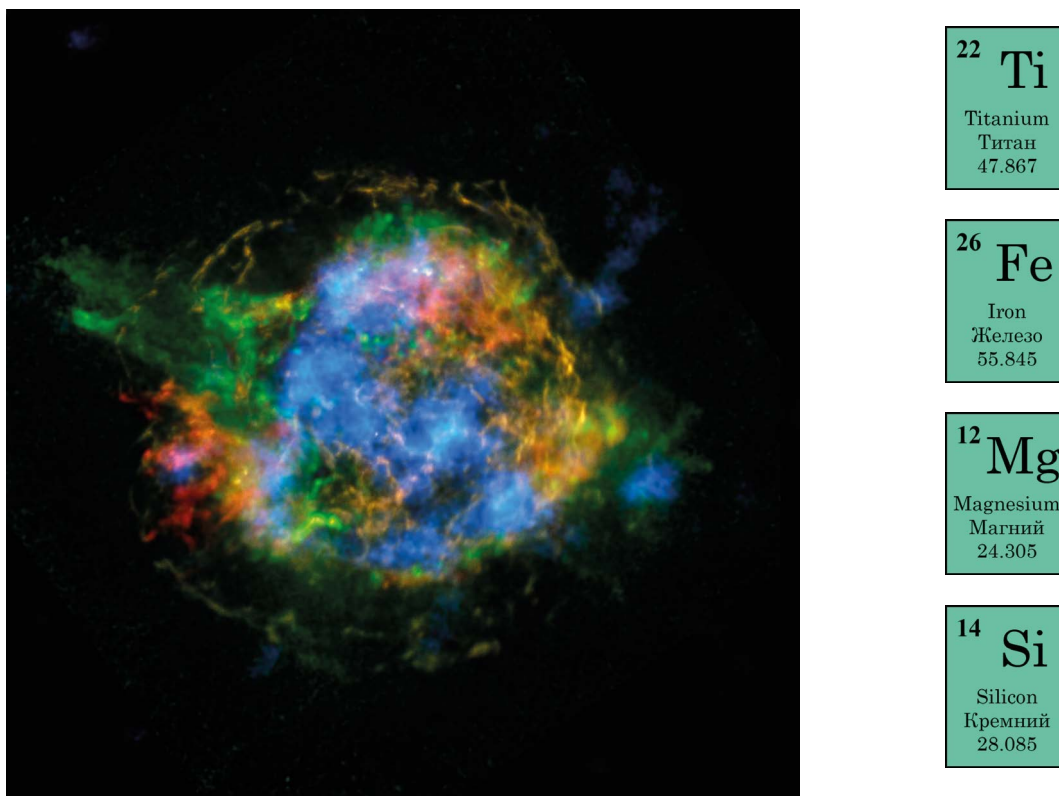


Рис. 7. Пространственное распределение разных химических элементов в остатке вспышки Сверхновой Cas A, измеренное по данным обсерваторий Chandra и NuSTAR. Излучение радиоактивного титана <sup>44</sup>Ti показано синим цветом, красным цветом показано распределение образовавшегося железа, зеленым – кремния и магния. (Предоставлено NASA / JPL-Caltech, см. также [6]).

расширяющийся горячий газ, образованный взрывом массивной звезды, произошедшей на расстоянии около 11 000 световых лет от Земли. Изображение представляет собой комбинацию рентгеновских снимков, полученных обсерваторией Chandra в диапазоне энергий от 1 до 7 кэВ, и высокоэнергичное рентгеновское излучение, формируемое в результате распада радиоактивного титана  $^{44}\text{Ti}$ , зарегистрированное обсерваторией NuSTAR в диапазоне энергий от 68 до 78 кэВ [6]. Излучение радиоактивного титана показано синим цветом (согласно оценкам он образовался в количестве, равном 0.00012–0.00016 массы Солнца), красным цветом показано распределение образовавшегося железа, зеленым – кремния и магния; желтый цвет – излучение мягкого рентгеновского континуума. Наблюдения обсерватории NuSTAR указывают на асимметрию произошедшего взрыва и дают новые данные для дальнейшего развития теории взрывов сверхновых [6].

### Слияния нейтронных звезд – основные источники элементов тяжелее железа во Вселенной

Как было отмечено выше, долгое время считалось, что элементы тяжелее железа образуются только во время вспышек сверхновых. Однако данные последних лет показывали, что наблюдаемого темпа таких вспышек не хватает для того, чтобы объяснить наблюдаемое обилие тяжелых элементов. И тогда была высказана идея, что значительное количество тяжелых элементов может рождаться во время слияний нейтронных звезд [7]. Такие слияния должны были бы сопровождаться мощнейшими выбросами энергии в  $\gamma$ -лучах, так называемыми короткими

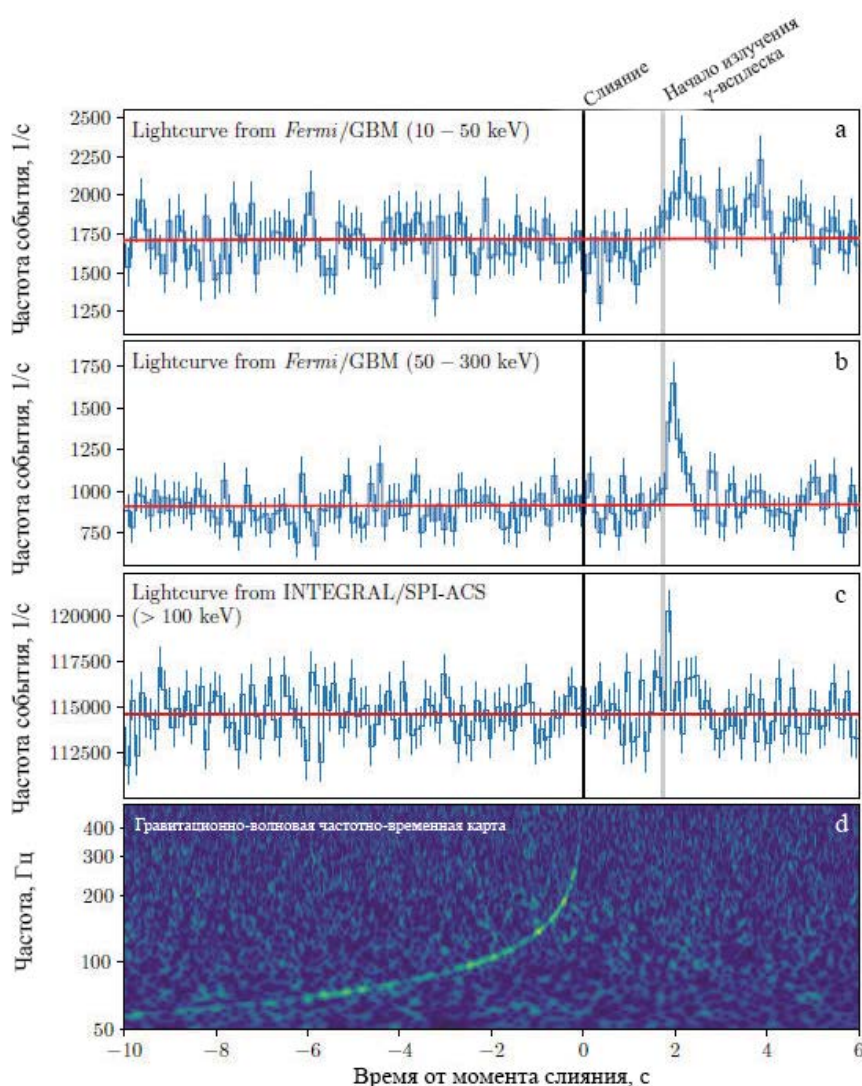


Рис. 8. Совместная регистрация гравитационно-волнового события GW170817 и одновременного излучения короткого  $\gamma$ -всплеска. Графики a и b отражают данные космической гамма-обсерватории Fermi, график c – данные обсерватории ИНТЕГРАЛ. Данные гравитационно-волновой обсерватории LIGO приведены на графике d. Черная вертикальная линия – момент слияния нейтронных звезд, серая – момент регистрации  $\gamma$ -излучения [10].

$\gamma$ -всплесками длительностью 1-2 секунды.

Нейтронные звезды представляются собой один из возможных конечных продуктов эволюции массивных звезд (рис. 1), когда после вспышки сверхновой звезда не разрушается полностью, а помимо выброшенного в пространство вещества, о котором речь шла выше, в остатке сверхновой остается компактный объект – черная дыра или нейтронная звезда.

Нейтронная звезда представляет собой чрезвычайно компактный и плотный объект: измеренные массы для большого количества нейтронных звезд лежат в пределах 1-2 масс Солнца, их радиусы составляют всего 10–13 км, а плотность в центре в несколько раз превышает ядерную. Точное уравнение состояния вещества при таких экстремальных условиях неизвестно, при этом считается, что от дальнейшего коллапса нейтронная звезда удерживается давлением вырожденного газа нейтронов. Верхний предел массы нейтронной звезды оценивается в 2-3

массы Солнца в зависимости от уравнения состояния. Выше этого предела нейтронная звезда коллапсирует в черную дыру.

Если в течение эволюции массивной двойной системы и последовательных вспышек сверхновой система не разрушится, то могут образоваться две нейтронные звезды, которые будут вращаться друг вокруг друга. При этом они будут постепенно сближаться, теряя энергию в виде излучающихся гравитационных волн [8]. Такая система может существовать сотни миллионов лет, пока звезды не сблизятся настолько, что под действием сил притяжения и приливных сил они не начнут разрушаться и не произойдет процесс слияния, который будет сопровождаться вспышкой гравитационно-волнового излучения и коротким  $\gamma$ -всплеском. Принимая во внимание планируемую чувствительность будущих инструментов и предполагаемую редкость слияний нейтронных звезд, большинство ученых ожидало, что такое событие может быть зарегистрировано не очень скоро, поэтому достаточно долгое время эти исследования носили теоретический характер.

Все изменилось 17 августа 2017 года, когда ученые впервые могли наблюдать момент слияния двух нейтронных звезд. Изначально гравитационно-волновой сигнал был зарегистрирован установками LIGO (США) / Virgo (Италия), представляющими собой три наземных интерферометра для регистрации

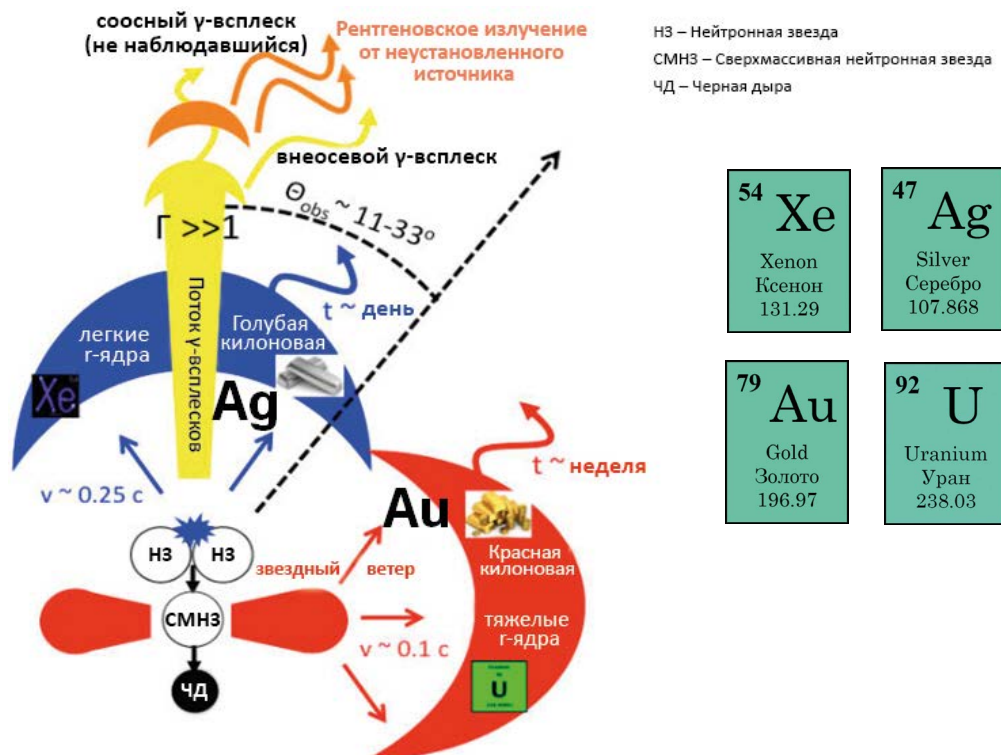


Рис. 9. Схематическое изображение процесса слияния нейтронных звезд с последующим формированием двух выбросов вещества в виде красной и голубой килоновых. Согласно современным представлениям именно в этих выбросах, движущихся с релятивистскими скоростями, и происходит образование сверхтяжелых элементов вплоть до золота и урана вследствие процессов нейтронного захвата [12].

таких событий. Через ~1.7 секунды после этого орбитальные обсерватории ИНТЕГРАЛ (ЕКА) и Fermi (НАСА) наблюдали короткий  $\gamma$ -всплеск (рис. 8, [9, 10]). Практически сразу же стало понятно, что оба сигнала являются разными проявлениями одного и того же события, связанного со столкновением двух нейтронных звезд. Менее чем через 12 часов после этого оптические телескопы обнаружили новый объект на краю близкой к нам галактики NGC4993 и установили, что событие слияния нейтронных звезд произошло на расстоянии примерно 130 млн световых лет от нас. В последующей кампании по наблюдению послесвечения от этого источника участвовали сотни телескопов и тысячи исследователей [11], и это была, пожалуй, самая уникальная из всех наблюдательных кампаний, когда исследования и обработка данных проводилась буквально «на лету» с немедленным информированием коллег о полученных результатах.

Теоретические расчеты и компьютерное моделирование показывали, что во время такого слияния небольшая часть вещества нейтронной звезды будет выброшена в окружающее пространство. Модели предсказывали, что благодаря огромной концентрации нейтронов, в этом облаке выброшенного вещества будет происходить синтез тяжелых элементов, и будет испускаться радиоактивное свечение в 10 миллионов раз ярче Солнца. Это явление было названо «килоновой» (по аналогии со «сверхновой»). Проведенные наблюдения блестяще подтвердили эту гипотезу, позволили правильно интерпретировать полученные данные и диагностировать наличие тяжелых элементов в обломках слияния. Например,

наблюдения, сделанные крупнейшей обсерваторией мира, такими как Gemini (США), Европейским Очень Большим Телескопом (VLT) и космическим телескопом им. Хаббла (HST), показали наличие недавно синтезированного материала, включая золото и платину, а также и радиоактивных элементов, таких как уран, тем самым давая ответ на загадку многих десятилетий: как в космосе производится около половины всех элементов тяжелее железа (рис. 9).

В апреле 2019 г. обсерватории LIGO / Virgo начали новый цикл поиска и наблюдений гравитационно-волновых событий, связанных со слияниями черных дыр и нейтронных звезд. За сообщениями с LIGO / Virgo практически в онлайн-режиме следят и космические обсерватории, и многие наземные телескопы, чтобы немедленно провести поиск электромагнитного сигнала, провести идентификацию возможного объекта и продолжить изучение процессов образования элементов во Вселенной.

В обзоре были использованы материалы и иллюстрации с сайтов НАСА, ЕКА, LIGO / Virgo Caltech, ИКИ РАН.

## Литература

1. E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle *Rev. Mod. Phys.*, 1957, **29**(4), 547. DOI: 10.1103/RevModPhys.29.547.
2. A. Frebel *Dædalus, J. Amer. Acad. Arts & Sci.: From Atoms to the Stars*, 2014, **143**(4), 71. DOI: 10.1162/DAED\_a\_00307.
3. R. Sunyaev, A. Kaniiovsky, V. Efremov, M. Gilfanov, E. Churazov, S. Grebenev, A. Kuznetsov, A. Melioranskiy, N. Yamburenko, S. Yumin, D. Stepanov, I. Chulkov, N. Pappe, M. Boyarskiy, E. Gavrilova, V. Loznikov, A. Prudkoglyad, V. Rodin, C. Reppin, W. Pietsch, J. Engelhauser, J. Trümper, W. Voges, E. Kendziorra, M. Bezler, R. Staubert, A.C. Brinkman, J. Heise, W.A. Mels, R. Jager, G.K. Skinner, O. Al-Emam, T.G. Patterson, A.P. Willmore *Nature*, 1987, **330**, 227. DOI: 10.1038/330227a0.
4. S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, C. Winkler *Nature*, 2012, **490**, 373. DOI: 10.1038/nature11473.
5. E. Churazov, R. Sunyaev, J. Isern, J. Knödlseeder, P. Jean, F. Lebrun, N. Chugai, S. Grebenev, E. Bravo, S. Sazonov, M. Renaud *Nature*, 2014, **512**, 406. DOI: 10.1038/nature13672.
6. B.W. Grefenstette, F.A. Harrison, S.E. Boggs, S.P. Reynolds, C.L. Fryer, K.K. Madsen, D.R. Wik, A. Zoglauer, C.I. Ellinger, D.M. Alexander, H. An, D. Barret, F.E. Christensen, W.W. Craig, K. Forster, P. Giommi, C.J. Hailey, A. Hornstrup, V.M. Kaspi, T. Kitaguchi, J.E. Koglin, P.H. Mao, H. Miyasaka, K. Mori, M. Perri, M.J. Pivovarov, S. Puccetti, V. Rana, D. Stern, N.J. Westergaard, W.W. Zhang *Nature*, 2014, **506**, 339. DOI: 10.1038/nature12997.
7. D. Eichler, M. Livio, T. Piran, D.N. Schramm *Nature*, 1989, **340**, 126. DOI: 10.1038/340126a0.
8. J.H. Taylor Jr. *Nobel Lecture*, December 8, 1993. (<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/taylor-lecture-1.pdf>).
9. V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Kuulkers, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, R. Diehl, A. Domingo, L. Hanlon, E. Jourdain, A. von Kienlin, P. Laurent, F. Lebrun, A. Lutovinov, A. Martin-Carrillo, S. Mereghetti, L. Natalucci, J. Rodi, J.-P. Roques, R. Sunyaev, P. Ubertini *Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L15. DOI: 10.3847/2041-8213/aa8f94.
10. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott et al) *Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L13. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
11. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott et al) *Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L12. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
12. B.D. Metzger *arXiv:1710.05931v1*, [astro-ph.HE], 16.10.2017. (<https://arxiv.org/pdf/1710.05931.pdf>).



English

# Stars from Cradle to Grave: Powerful Factories of Chemical Elements

Alexander A. Lutovinov  
 Professor,  
 Space Research Institute, RAS  
 84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia  
 aal@iki.rssi.ru

## Abstract

The first elements of the Periodic Table – hydrogen, helium and partly lithium - appeared in the first seconds after the birth of the Universe. The first stars “gathered” from these materials are the natural factories of the synthesis of heavier elements, not only throughout their lives, but even during their death process, during Supernova explosions. Supernova explosions, in their turn, are powerful factories for the production of heavy elements. Modern instruments allow scientists not only to register such events, but also to determine how many different chemical elements were formed during such events. The recent discovery of the merging neutron stars and subsequent studies of their afterglow allowed us to clarify the process of formation of superheavy elements in the Universe up to the gold and uranium. Thus, astrophysical observations give scientists the most important information about the “production rates” of elements in the nature, and their abundance in the Universe.

**Keywords:** stars, evolution, thermonuclear reaction, supernova, merging of neutron stars.

## Images & Tables

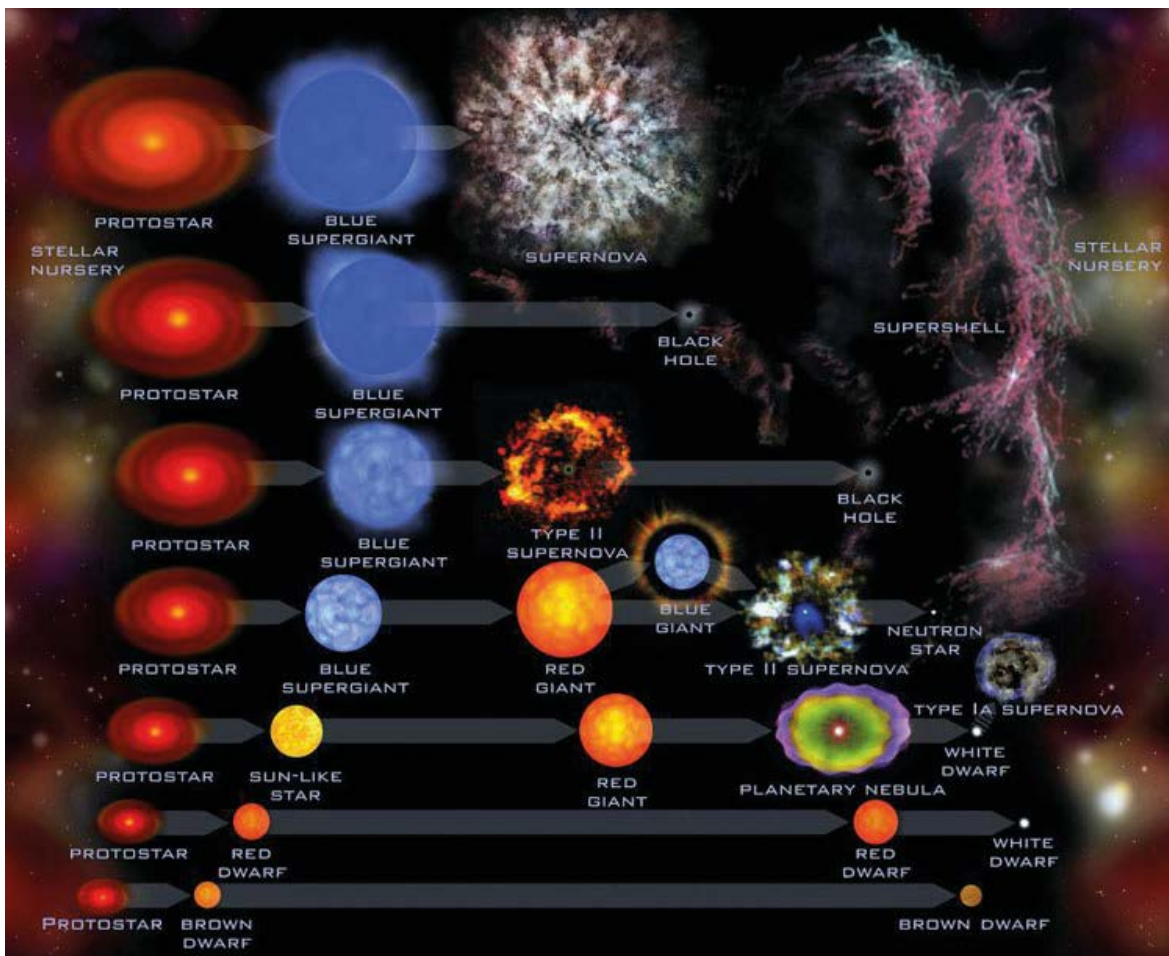


Fig. 1. Different stages of the stars evolution depending on their initial masses. (Credit: NASA / CXC / M. Weiss).

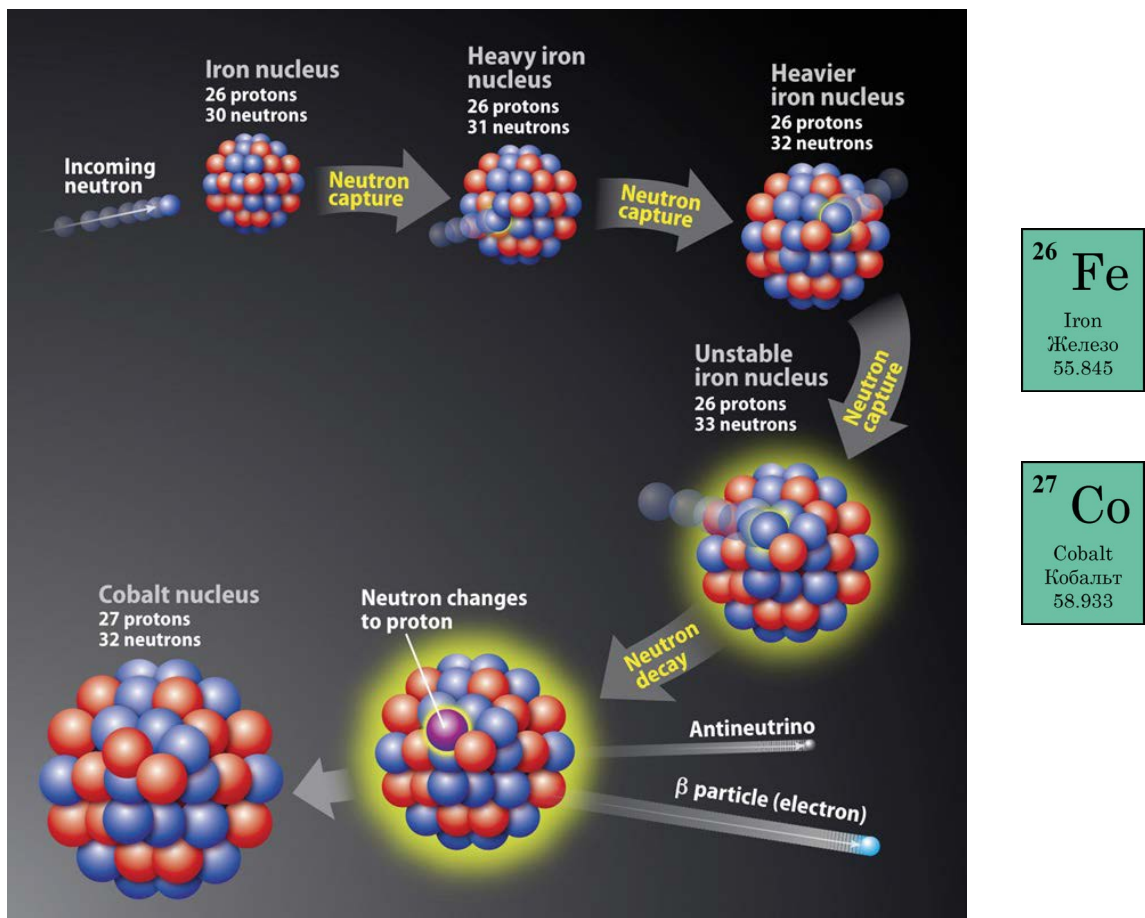


Fig. 2. The forming of a stable cobalt isotope from an iron by a few neutrons capture. (Credit: Astronomy Magazine).

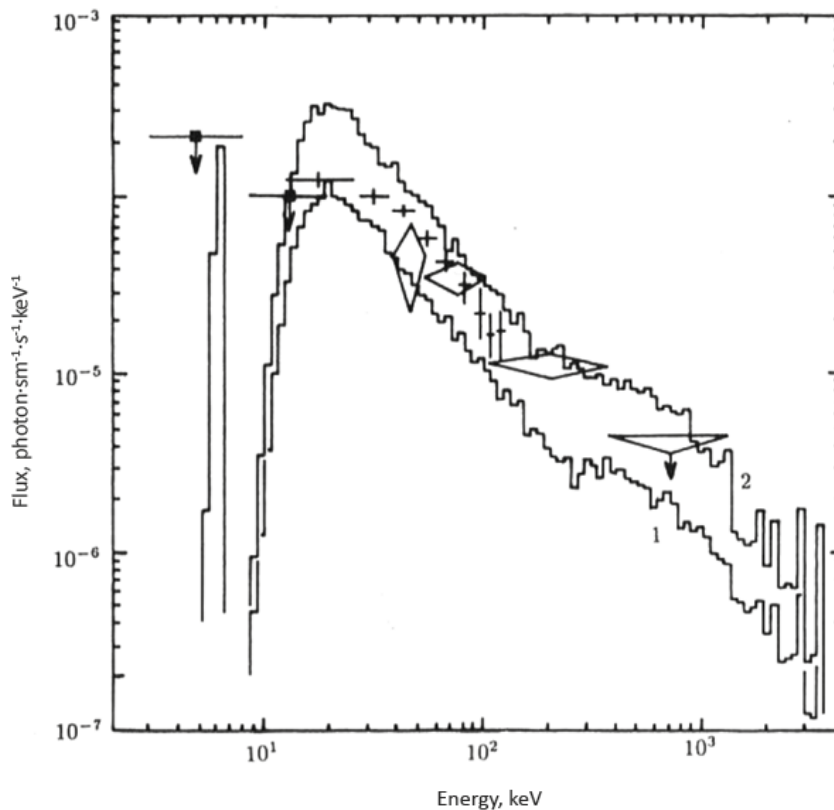


Fig. 3. Spectrum of the Supernova SN1987A observed by the ROENTGEN Observatory (crosses, rhombuses). Histogram shows the results of theoretical predictions [3].

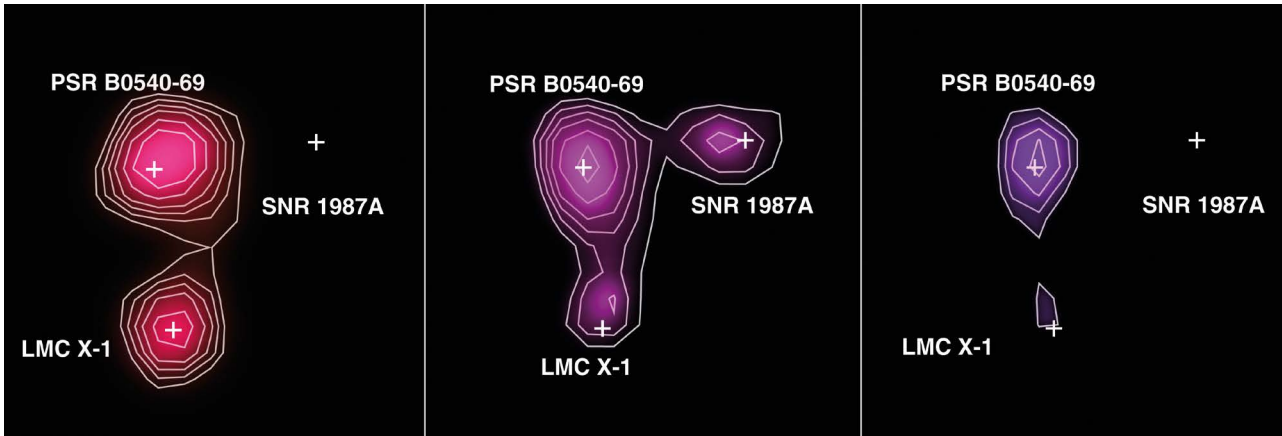


Fig. 4. Images of the sky patch containing the Supernova SN1987A remnant, obtained by the INTEGRAL observatory in different energy ranges. The middle picture corresponds to the energy range of 65–82 keV, which includes both decay lines of radioactive titanium  $^{44}\text{Ti}$  ([4] and ESA site data).

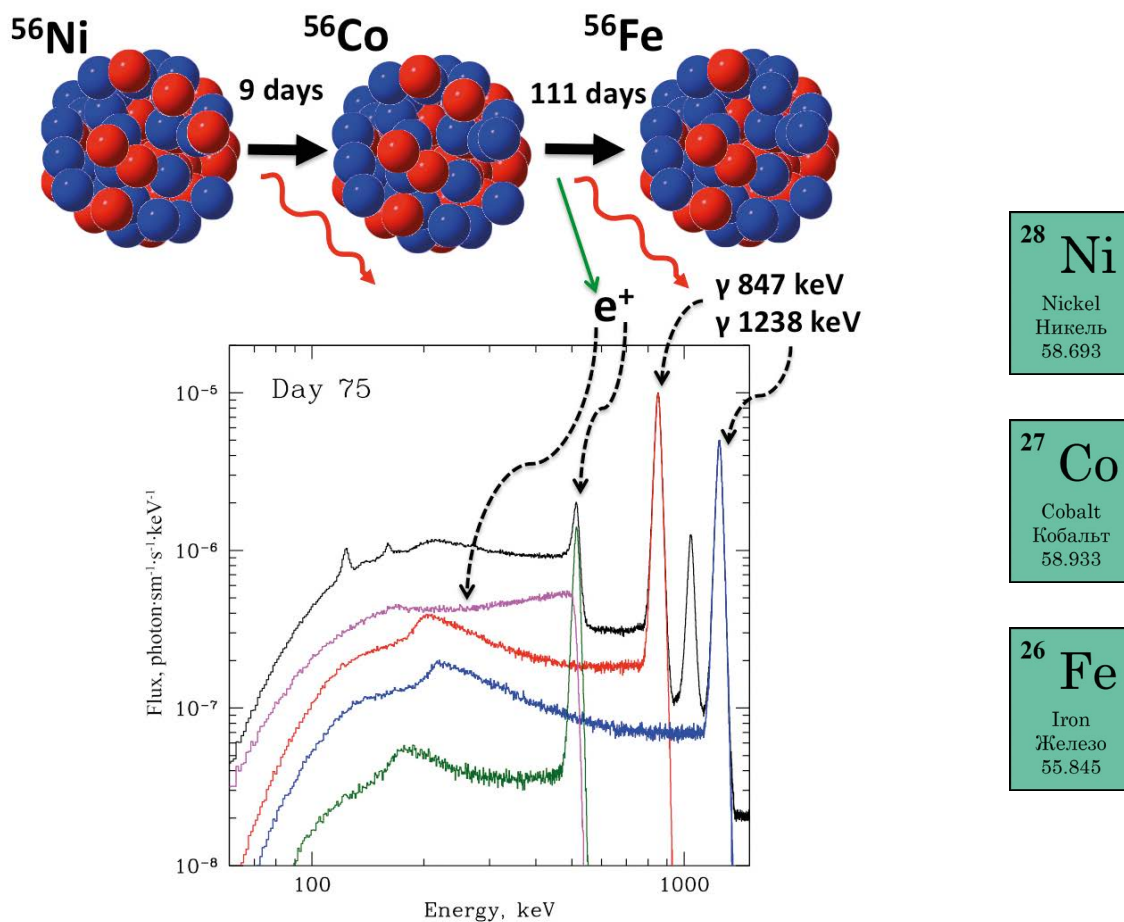


Fig. 5. Scheme of the radioactive nickel  $^{56}\text{Ni}$  decay into cobalt  $^{56}\text{Co}$  and further into iron  $^{56}\text{Fe}$ , indicating the energy of the brightest  $\gamma$ -ray lines and characteristic half-lives. (Credit: IKI / E. Churazov, see also [5]).

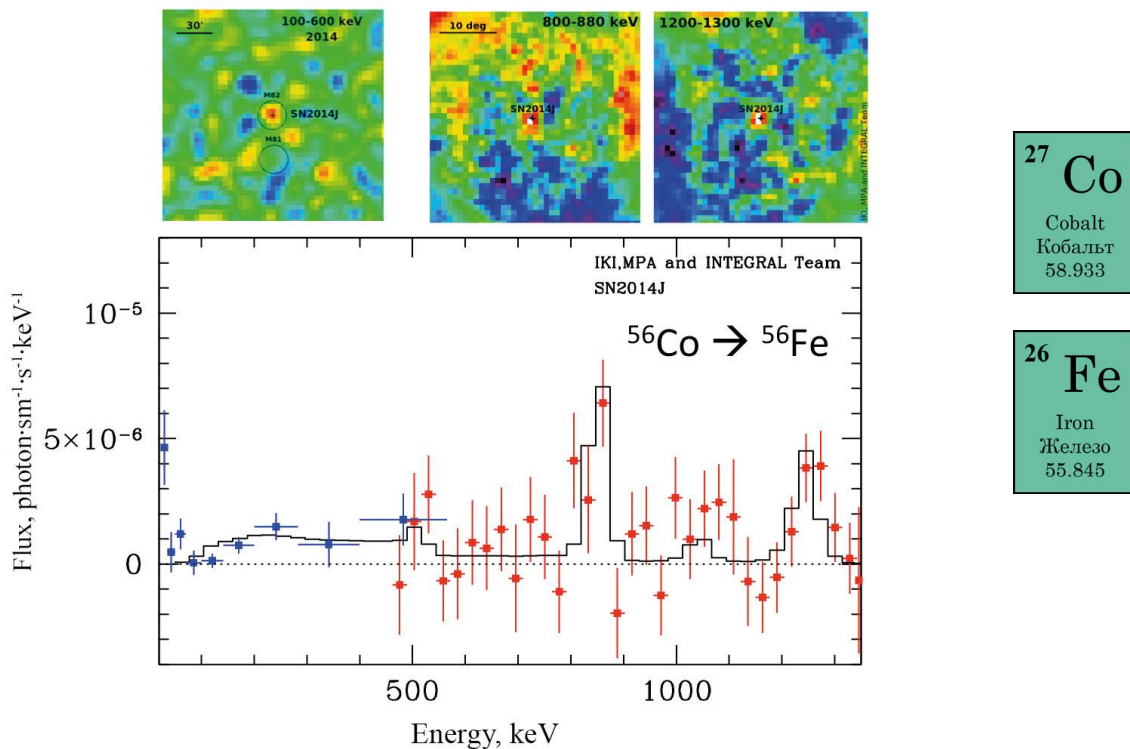


Fig. 6. Observations of SN2014J Supernova obtained by the INTEGRAL observatory. (Credit: IKI / E. Churazov, see also [5]).

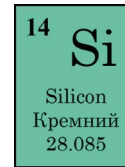
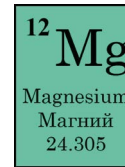
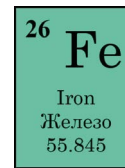
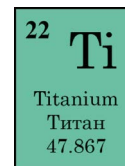
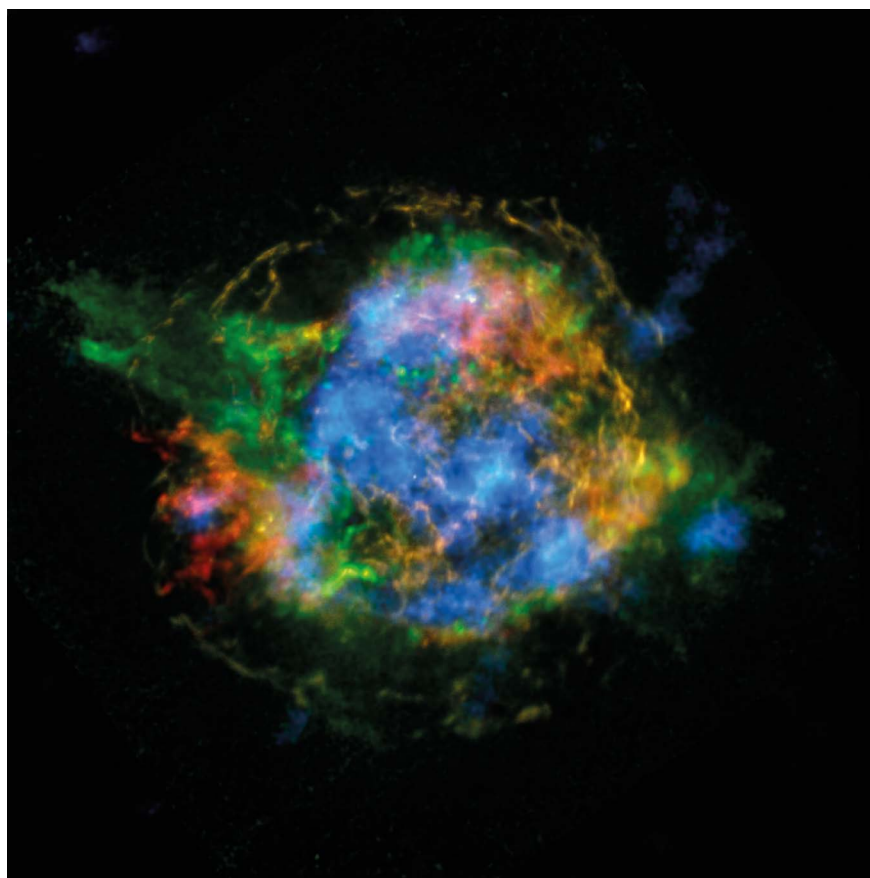
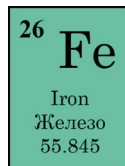
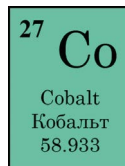


Fig. 7. Spatial distribution of different chemical elements in the Cas A Supernova remnant, determined on the base of the Chandra and NuSTAR observatories data. Emission of radioactive titanium <sup>44</sup>Ti is shown in blue, the distribution of the iron is shown in red, green color corresponds to silicon and magnesium. (Courtesy NASA / JPL-Caltech, see also [6]).

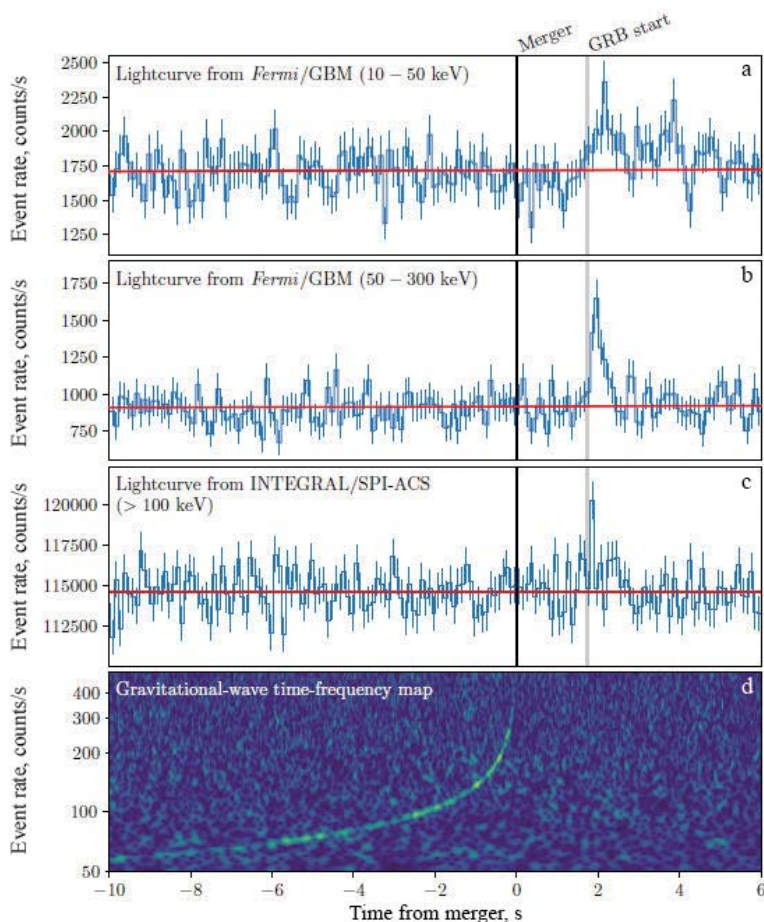


Fig. 8. Joint registration of the GW170817 gravitational-wave event and the simultaneous emission of a short  $\gamma$ -ray burst. The plots a and b demonstrate the data of the Fermi observatory, the plot c presents the INTEGRAL observatory data. The gravitational-wave signal obtained by the LIGO observatory is shown on the plot d. The black vertical line is the moment of neutron stars merging; the gray line is the moment of the gamma-ray burst [10].

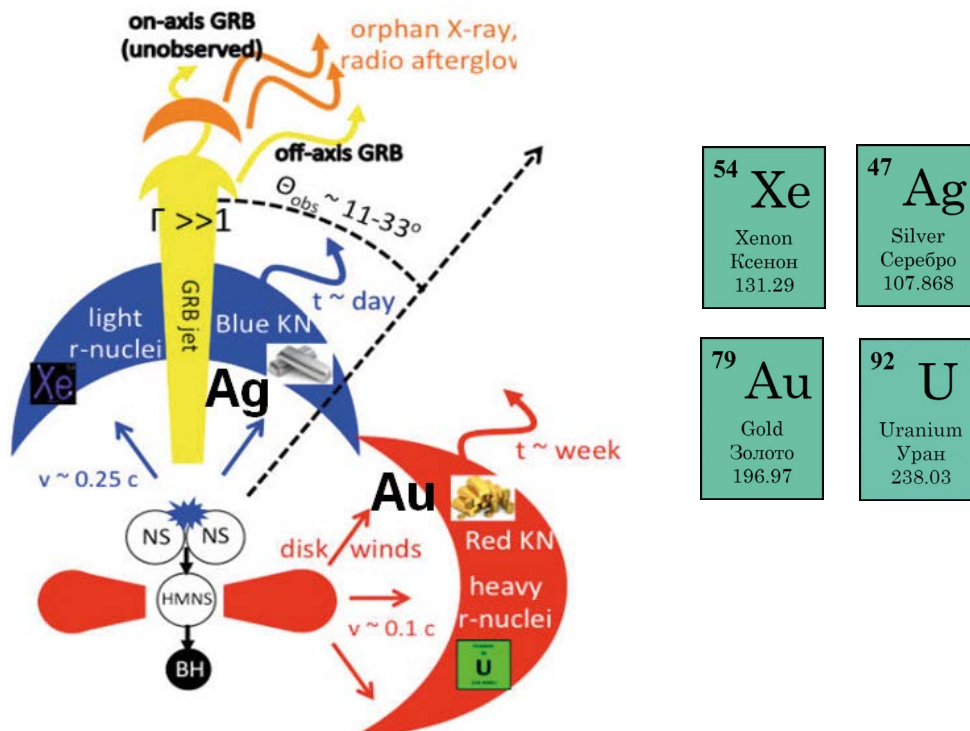


Fig. 9. A schematic representation of the process of neutron stars merging with the subsequent formation of two ejecta of matter in the form of red and blue kilonova. According to modern concepts, the formation of heavy elements (up to gold and uranium) occurs in these ejecta as a result of neutron capture processes [12].

## References

1. E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle  
*Rev. Mod. Phys.*, 1957, **29**(4), 547. DOI: 10.1103/RevModPhys.29.547.
2. A. Frebel  
*Dædalus, J. Amer. Acad. Arts & Sci.: From Atoms to the Stars*, 2014, **143**(4), 71. DOI: 10.1162/DAED\_a\_00307.
3. R. Sunyaev, A. Kaniovsky, V. Efremov, M. Gilfanov, E. Churazov, S. Grebenev, A. Kuznetsov, A. Melioranskiy, N. Yamburenko, S. Yunin, D. Stepanov, I. Chulkov, N. Pappe, M. Boyarskiy, E. Gavrilova, V. Loznikov, A. Prudkoglyad, V. Rodin, C. Reppin, W. Pietsch, J. Engelhauser, J. Trümper, W. Voges, E. Kendziorra, M. Bezler, R. Staubert, A.C. Brinkman, J. Heise, W.A. Mels, R. Jager, G.K. Skinner, O. Al-Emam, T.G. Patterson, A.P. Willmore  
*Nature*, 1987, **330**, 227. DOI: 10.1038/330227a0.
4. S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, C. Winkler  
*Nature*, 2012, **490**, 373. DOI: 10.1038/nature11473.
5. E. Churazov, R. Sunyaev, J. Isern, J. Knödseder, P. Jean, F. Lebrun, N. Chugai, S. Grebenev, E. Bravo, S. Sazonov, M. Renaud  
*Nature*, 2014, **512**, 406. DOI: 10.1038/nature13672.
6. B.W. Grefenstette, F.A. Harrison, S.E. Boggs, S.P. Reynolds, C.L. Fryer, K.K. Madsen, D.R. Wik, A. Zoglauer, C.I. Ellinger, D.M. Alexander, H. An, D. Barret, F.E. Christensen, W.W. Craig, K. Forster, P. Giommi, C.J. Hailey, A. Hornstrup, V.M. Kaspi, T. Kitaguchi, J.E. Koglin, P.H. Mao, H. Miyasaka, K. Mori, M. Perri, M.J. Pivovarov, S. Puccetti, V. Rana, D. Stern, N.J. Westergaard, W.W. Zhang  
*Nature*, 2014, **506**, 339. DOI: 10.1038/nature12997.
7. D. Eichler, M. Livio, T. Piran, D.N. Schramm  
*Nature*, 1989, **340**, 126. DOI: 10.1038/340126a0.
8. J.H. Taylor Jr.  
*Nobel Lecture*, December 8, 1993. (<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/taylor-lecture-1.pdf>).
9. V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Kuulkers, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, R. Diehl, A. Domingo, L. Hanlon, E. Jourdain, A. von Kienlin, P. Laurent, F. Lebrun, A. Lutovinov, A. Martin-Carrillo, S. Mereghetti, L. Natalucci, J. Rodi, J.-P. Roques, R. Sunyaev, P. Ubertini  
*Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L15. DOI: 10.3847/2041-8213/aa8f94.
10. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott et al)  
*Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L13. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
11. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott et al)  
*Astrophys. J. Let.*, 2017, **848**(2), L12. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
12. B.D. Metzger  
*arXiv:1710.05931v1*, [astro-ph.HE], 16.10.2017. (<https://arxiv.org/pdf/1710.05931.pdf>).

# Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева

Ю.Ц. Оганесян

В шестидесятые годы XX века была обоснована возможность существования области повышенной стабильности сверхтяжелых ядер в районе порядкового числа  $Z \approx 114$  и числа нейтронов  $N \approx 184$ . Впервые успешный синтез сверхтяжелых элементов был осуществлен в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ). В реакциях слияния ядер трансурановых элементов с ядрами кальция-48 были синтезированы сверхтяжелые элементы Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева с атомными номерами 114–118.

В статье рассматриваются подходы к выбору реакций для синтеза новых элементов, методы изучения их ядерно-физических и химических свойств. Описываются создаваемый в ОИЯИ экспериментальный комплекс – «Фабрика сверхтяжелых элементов» и перспективы развития дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева, сверхтяжелые элементы, ускорители тяжелых ионов, сепараторы продуктов ядерных реакций.

## Введение

С момента открытия в 1940 году первого трансуранового элемента – нептуния – за 60 лет в XX веке были синтезированы 20 новых химических элементов. Из них элементы с порядковыми номерами 102 и 105 были впервые получены в ОИЯИ, а в открытие элементов с номерами 103, 104 и 108 дубненские физики внесли определяющий вклад [1].

Благодаря накопленным данным и развитию новых представлений о свойствах наиболее тяжелых нуклидов учеными ОИЯИ в 1966 году была обоснована возможность существования области повышенной стабильности сверхтяжелых ядер в районе зарядового числа  $Z \approx 114$  и числа нейтронов  $N \approx 184$  [2].

Проблема существования сверхтяжелых элементов (СТЭ), безусловно, относится к наиболее фундаментальным проблемам естествознания и затрагивает широкий круг наук. В первую очередь это проблемы ядерной физики: вопрос о границах

стабильности ядерной материи. Другой комплекс проблем связан со свойствами сверхтяжелых атомов – проявлением релятивистских эффектов в химических свойствах элементов.

Впервые успешный синтез сверхтяжелых элементов был осуществлен в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В реакциях слияния ядер искусственных элементов тяжелее урана с ядрами изотопа кальция с атомной массой 48 были синтезированы пять новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева с порядковыми номерами 114–118.

114 Fl Flerovium Флеровий	115 Mc Moscovium Московский	116 Lv Livermorium Ливерморий	117 Ts Tennessine Теннессин	118 Og Oganesson Оганесон
------------------------------------	--------------------------------------	--	--------------------------------------	------------------------------------

По решению Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) для новых элементов были официально утверждены названия и символы [3, 4]: 114-й элемент – флеровий (flerovium, Fl), 115-й – московий (moscovium, Mc), 116-й элемент – ливерморий (livermorium, Lv), 117-й – теннессин (tennessine, Ts) и 118-й – оганесон (oganesson, Og).



### ОГАНЕСЯН

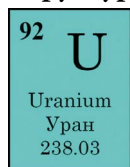
Юрий Цолакович

академик, профессор,  
Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова  
Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований

### Основы мироздания

Периодическая таблица Д.И. Менделеева (1869), демонстрирующая закономерность в химическом поведении известных к тому времени 63 элементов, показала, что атом (элемент) не является неделимым, так как сам имеет внутреннюю структуру, лежащую в основе этой закономерности. Действительно, через 28 лет Дж.Дж. Томсон обнаружил в атоме мельчайшие отрицательно заряженные частицы – электроны (1897). И спустя еще 14 лет Эрнст Резерфорд предложил свою известную планетарную модель атома (1911) в виде плотного ядра, несущего практически всю массу и весь положительный заряд атома, и электронов,двигающихся вокруг ядра на большом расстоянии. В первой теоретической модели (Г.А. Гамов, 1928) атомное ядро рассматривалось в виде сферической равномерно заряженной капли из особой материи, напоминающей жидкость. Модель оказалась весьма продуктивной. На ее основе самим Г.А. Гамовым была построена теория  $\alpha$ -распада (1928), автором известной формулы К.Ф. фон Вайцеккером рассчитана энергия связи протонов и нейтронов в ядрах (1936), Н. Бором и Дж.А. Уилером [5] создана капельная теория ядерного деления (1939).

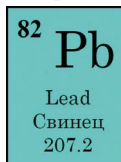
### Структура и стабильность тяжелых ядер



Согласно теории Н. Бора и Дж.А. Уилера, тяжелое ядро предохраняет от распада на фрагменты потенциальный барьер. Высота барьера деления для ядра  $^{238}\text{U}$  равна 6 МэВ. Парциальный период спонтанного деления этого ядра составляет  $T_{\text{сд}} = 10^{16}$  лет (Г.Н. Флеров и К.А. Петржак, 1940 [6]). Для ядер тяжелее урана повышение заряда ядра приводит к понижению барьера деления и к значительному уменьшению  $T_{\text{сд}}$ . С исчезновением барьера ( $B_f \approx 0$ ) ядро разделится на два осколка за кратчайшее время  $T_{\text{сд}} = 10^{-19}$  с. В модели жидкой капли этот предел наступает уже для ядер с  $Z \geq 100$ . Предел же существования элементов (атомов) наступает несколько раньше, так как при  $T_{\text{сд}} \leq 10^{-14}$  с ядро распадается раньше, чем вокруг него появятся орбитальные электроны.

Однако далеко не все данные, полученные в исследованиях этого процесса в последующие годы, описывались капельной моделью деления. Открытие спонтанно деющихся изомеров (1962) [7] в 33 изотопах от U до Cf прямо противоречило модели жидкой капли. Изомерия ядерных форм, наличие у ядер двух (иногда трех) состояний, из которых происходит спонтанное деление, не совместимы с представлением о ядре как о бесструктурной, аморфной материи. Более адекватная теория создавалась в последующие годы многими теоретиками мира.

Одним из фундаментальных следствий новой теории явилось предсказание о возможном существовании гипотетических сверхтяжелых элементов. На пути к делению тяжелого ядра движение его нуклонов связано с коллективными степенями свободы всей системы. Наиболее ярко эта связь проявляется в делении тяжелых ядер, которые могут существовать только благодаря особой внутренней структуре – так называемому эффекту замыкания оболочек, проявляющемуся при определенных числах протонов и нейтронов: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126. С этой точки зрения синтез и изучение свойств распада сверхтяжелых ядер является прямой проверкой базисных положений микроскопической теории ядра.



Существование ядер «второй сотни» ожидается там, где будут возникать новые замкнутые оболочки. В области транс-актиноидов (элементов с  $Z > 103$ ) по предсказаниям макро-микроскопической модели ядра такие оболочки ожидалось для деформированных ядер с числом протонов  $Z = 108$  и числом нейтронов  $N = 162$  [8]. Еще более сильный эффект предсказывался для сферических ядер, более тяжелых (сверхтяжелых), с  $Z = 114$  и  $N = 184$  [9], подобных по форме и внутренней структуре «дважды магическому» ядру  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ,  $N = 126$ ). По мере удаления от магических чисел эффект замыкания оболочек быстро уменьшается, что приводит к резкому падению стабильности ядер. Поэтому области существования сверхтяжелых элементов имеют вид «островов» с крутыми склонами, погруженных в глубокое «море нестабильности», где в отсутствие эффекта замыкания ядерных оболочек элементы существовать не могут

### Поиск гипотетических сверхтяжелых элементов

После первых впечатляющих публикаций оценок периодов полураспада

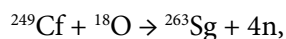


пада ядерных тяжеловесов, находящихся вблизи вершины «острова», сравнимых в некоторых случаях с возрастом Солнечной системы, начался экспериментальный штурм гипотетических СТЭ. В то время в лабораториях Беркли и Дубны шли трудные, но, казалось, уже обнадеживающие эксперименты по синтезу только 105-го элемента. Неудивительно, что синтез 114-го элемента казался тогда почти несбыточной мечтой.

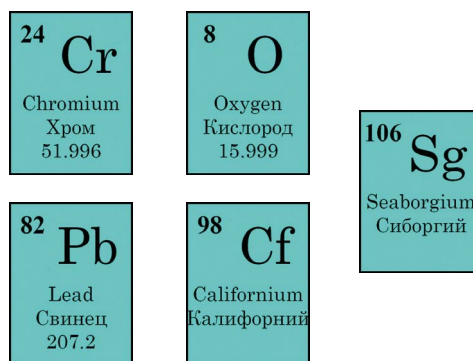
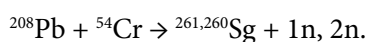
Перед каждой лабораторией стояла задача найти способ синтеза и обнаружения сверхтяжелых элементов. СТЭ искали в природе: в земных, лунных образцах, в космических лучах и в метеоритах. Было сделано много попыток их искусственного синтеза с использованием высокопоточных ядерных реакторов, даже ядерных взрывов, мощных ускорителей тяжелых ионов. Были созданы уникальные установки и методики с рекордной чувствительностью для сепарации и регистрации редчайших событий образования и распада сверхтяжелых нуклидов. К сожалению, во всех экстенсивных попытках, предпринятых в течение 15 лет, СТЭ не были найдены [10]. Это породило некий пессимизм; в статьях и выступлениях можно было часто встретить суждения о том, что красивая теоретическая гипотеза о СТЭ, может быть, и имеет право на жизнь, но доказать ее практически невозможно.

### Важное отступление

В 1974 г. в двух лабораториях с разницей в несколько месяцев были получены первые результаты по синтезу нового, 106-го, элемента (Sg) в реакциях слияния разного типа: в Беркли (США) в реакции [11]:



в Дубне в реакции [12]:



Сечения образования изотопов Sg в этих реакциях примерно одинаковы. Но в способе их получения есть существенное различие. В слиянии с «магическим» ядром  $^{208}\text{Pb}$  энергия возбуждения компаунд-ядра  $^{262}\text{Sg}^*$  на кулоновском барьере реакции примерно втрое меньше, чем в реакции Cf + O. В реакции со свинцом происходит своего рода «холодное слияние», что способствует выживанию компаунд-ядра в процессе его охлаждения эмиссией нейтронов. В реакциях холодного слияния, с мишенями из  $^{208}\text{Pb}$  или  $^{209}\text{Bi}$ , можно наращивать массу и заряд бомбардирующего иона, всегда получая слабо нагретое компаунд-ядро. Именно по этому сценарию развивались события последующие 38 лет. Основные работы по синтезу элементов тяжелее Sg ( $Z = 106-112$ ) проводились в 1981–1996 гг. в GSI (Институт тяжелых ионов, Дармштадт, Германия) с участием физиков и химиков из Европы и стран других континентов [13]. Наконец значительно позже, уже в новом столетии, проявив определенную смелость и терпение, в RIKEN (Токио, Япония) по реакции  $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn}$  за 10 лет работы ученые синтезировали три атома элемента с числом протонов 113 [14].

Факт существования ядер с  $Z = 106-112$ , и характер их последовательных  $\alpha$ -распадов количественно были весьма близки к расчетам на основании макро-микроскопической модели ядра. Поэтому предсказания о существовании обширного «острова» более тяжелых (скажем – сверхтяжелых) и более стабильных ядер, возникающего вследствие эффекта замыкания следующих сферических оболочек  $Z = 114$  и  $N = 184$ , стали выглядеть более убедительными. Но по-прежнему все трудности их получения и исследования были связаны с реакциями синтеза СТЭ, так как ни одна из реальных комбинаций «бомбардирующая частица – мишень» не могла создать столь массивное ядро, содержащее более 60% нейтронов.

### Реакции синтеза

В подобной ситуации остается единственная возможность – наращивать число нейтронов в сливаю-

щихся ядрах. Для синтеза 114-го элемента была выбрана реакция горячего слияния



$^{94}\text{Pu}$ Plutonium Плутоний	$^{20}\text{Ca}$ Calcium Кальций 40.078	$^{114}\text{Fl}$ Flerovium Флеровий
---	--	--

где ядром-мишенью является долгоживущий изотоп  $^{244}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} = 8 \cdot 10^7$  лет), а бомбардирующим ядром – стабильный, но редкий и очень дорогостоящий изотоп  $^{48}\text{Ca}$  [15].

Компаунд-ядро  $^{292}\text{Fl}^*$ , содержащее 114 протонов и 178 нейтронов, всё еще удалено от «дважды магического» ядра  $^{292}\text{Fl}$  ( $Z = 114, N = 184$ ) на 6 нейтронов. Но в этом случае теорией предсказывался уже заметный рост барьера деления сверхтяжелого компаунд-ядра, что должно было существенно увеличить его выживаемость в процессе охлаждения. Ожидания оправдались: сечение образования  $^{288}\text{Fl}$  в реакции  $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  оказалось примерно в 500 раз выше сечения образования более легкого ядра  $^{278}\text{Nh}$  ( $Z = 113$ ), полученного в реакции холодного слияния  $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn}$ .

### Техника эксперимента

Эксперименты проводились на выведенных пучках ускоренных ионов циклотрона У-400 (рис. 1) в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Циклотрон У-400 был запущен в 1980 году и с тех пор неоднократно модернизировался. Развитие ускорителя было направлено на повышение интенсивности и качества пучков и на расширение набора ускоряемых ионов.

Циклотрон может использоваться как в качестве постускорителя для получения пучков ионов радиоактивных изотопов, так и в качестве независимой установки.

Основное внимание уделялось обеспечению бесперебойной и стабильной работы всех систем в длительных экспериментах. Среднее время работы циклотрона составляло более 6000 часов в год. Примерно 2/3 этого времени было использовано для выполнения программы экспериментов по синтезу сверхтя-



Рис. 1. Ускоритель тяжелых ионов У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

20  
Ca  
Calcium  
Кальций  
40.078

желых элементов с применением пучка  $^{48}\text{Ca}$  с энергией 230–280 МэВ. При работе ускорителя в этом режиме эффективность использования рабочего вещества – редкого изотопа  $^{48}\text{Ca}$  – играет решающую роль.

На циклотроне У-400 использовался специализированный источник ионов электронного циклотронного резонанса ECR-4M, предназначенный для получения интенсивных пучков ионов средних масс.

Благодаря оптимизации режимов работы источника, каналов транспорта пучка и режимов ускорения удалось обеспечить на мишени ток ионов  $^{48}\text{Ca}$  до  $10^{13} \text{ c}^{-1}$  при расходе кальция 0.4 мг/час.

Для регистрации редких событий образования и распада сверхтяжелых ядер был создан быстродействующий электромагнитный сепаратор ГНС-1 [16], представленный на рис. 2.

Сепаратор был сконструирован и настраивался на выделение продуктов реакций полного слияния. Эти ядра самые тяжелые, они образуются в результате полной передачи им-

пульса ускоренного иона компаунд-ядру суммарной массы.

Вылетевшие из мишени ядра отдачи попадают в среду водорода низкого давления (около 1 мм Нг) где приобретают разные ионные заряды в зависимости от скорости, что делает их различными по магнитной жесткости. Отбор атомов отдачи по энергии осуществляется в магнитном поле. Продукты с максимальной магнитной жесткостью собираются на фокальную плоскость сепаратора, расположенную на расстоянии 4 м от мишени. Это расстояние сверхтяжелый атом пролетает за 1 мкс.

В фокальной плоскости сепаратора расположена детекторная сборка. Ядра отдачи после прохождения времяпролетного спектрометра останавливаются в позиционночувствительном фронтальном детекторе. Фронтальный детектор регистрирует энергию и время прихода ядра отдачи, координаты его имплантации на поверхности детектора, а также продукты распада имплантированного ядра ( $\alpha$ -частицы, или осколки деления). Подобная система регистрации позволяет установить генетическую связь пришедшего от мишени ядра с продуктами его распада. По радиоактивным свойствам дочерних, внучатых, правнучатых и прочих ядер определяется сценарий и характеристики распада всего радиоактивного семейства.

### Результаты экспериментов

Результаты самых первых экспериментов, полученные в 2000 году в реакциях  $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$

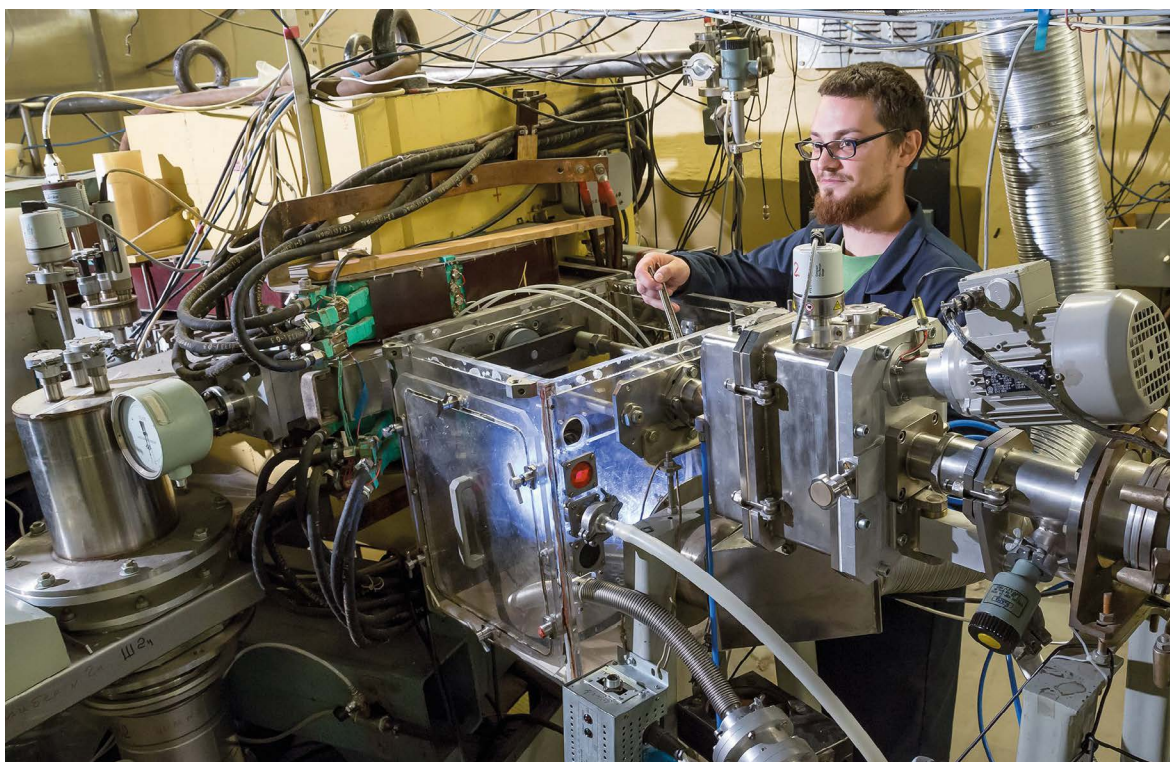
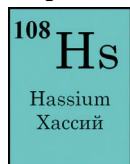


Рис. 2. Внешний вид газонаполненного сепаратора ГНС-1.

и  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ , сценарии распада и свойства ядер в цепочках последовательных  $\alpha$ -распадов находились в хорошем согласии с упомянутыми выше расчетами по макро-микроскопической модели. По сравнению с самыми тяжелыми изотопами 110-го и 112-го элементов, полученными в реакциях холодного слияния, изотопы этих элементов, полученные в реакциях с  $^{48}\text{Ca}$ , имеют дополнительно восемь нейтронов. В результате их периоды полураспада возросли примерно в  $10^5$  раз! Подобный эффект свидетельствует о том, что нейтроноизбыточные изотопы этих элементов уже вошли в область действия нейтронной оболочки  $N = 184$ . Отметим, что наиболее тяжелые изотопы 114-го и 116-го элементов всё еще удалены от оболочки  $N = 184$  на девять и семь нейтронов соответственно.

Дальнейшие события развивались достаточно быстро [17]. Используя в качестве мишеней доступные и относительно долгоживущие изотопы Ra, U, Pu, Cm, и Cf, в ядерных реакциях с  $^{48}\text{Ca}$  удалось синтезировать различные изотопы Z-четных элементов от 108-го до 118-го. Практически все синтезированные ядра испытывают один или несколько  $\alpha$ -распадов, которые оканчиваются спонтанным делением. Энергии  $\alpha$ -переходов для нуклидов, берущих начало от материнских ядер с четным числом протонов, согласуются с предсказаниями различных моделей в пределах 5–7 %.



В распаде «дважды магического» ядра  $^{270}\text{Hs}$  ( $Z = 108$ ,  $N = 162$ ) спонтанное деление не наблюдалось ( $T_{\text{сд}} \geq 10$  с). Однако с ростом числа нейтронов в области  $N > 162$  парциальный период спонтанного деления быстро уменьшается. Следует отметить, что изотопы других элементов с  $Z = 110$ , 112 и 114 в области  $N = 169$ –170 испытывают спонтанное деление с периодом полураспада несколько миллисекунд. Эта своего рода «яма» находится между замкнутыми нейтронными оболочками  $N = 162$  и  $N = 184$ , там, где эффект замыкания оболочек минимален.

При  $N > 171$  парциальный период  $T_{\text{сд}}$  снова быстро возрастает с ростом числа нейтронов – вступает в действие эффект нейтронной оболочки  $N = 184$ . Ядра с  $N \geq 172$  испытывают преимущественно  $\alpha$ -распад. Такая зависимость  $T_{\text{сд}}$  от  $N$  есть наглядная демонстрация того, что устойчивость сверхтяжелых ядер к спонтанному делению целиком определяется эффектом ядерных оболочек.

Описанную выше картину образования и распада сверхтяжелых ядер дополнили 29 Z-нечетных изотопов, полученные в реакциях  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и  $^{249}\text{Bk}$  с изотопом  $^{48}\text{Ca}$ . В силу больших запретов на спонтанное деление ядер с нечетным числом протонов (и нейтронов) цепочки последовательных  $\alpha$ -переходов в ядрах 113-

го, 115-го и 117-го элементов тянутся вплоть до изотопов 105-го элемента (Db). В длинных цепочках распада можно наблюдать изменения стабилизирующего эффекта сферической оболочки  $N = 184$  в сверхтяжелых ядрах Mc/Ts, его падение в дочерних ядрах и усиление в 4–5-м поколении, при подходе к деформированной оболочке  $N = 162$  в конечных ядрах  $^{268}\text{Db}$  и  $^{270}\text{Db}$ . Для последних наблюдается спонтанное деление с периодами полураспада от 0.2 до 30 часов. Весьма вероятно, что спонтанное деление относится к четно-четным ядрам  $^{268}\text{Rf}$  ( $N = 164$ ) и  $^{270}\text{Rf}$  ( $N = 166$ ) – продуктам электронного захвата изотопов Db. В процессе деформации ядер Rf на пути к точке разрыва эффект нейтронной оболочки  $N = 82$  в осколках деления должен приводить почти к строго симметричному делению с энергией реакции  $Q_{\text{F}} \sim 280$  МэВ.

### Сверхтяжелые элементы на карте нуклидов

Синтез новых элементов в реакциях холодного и горячего слияния с ядрами  $^{48}\text{Ca}$  существенно обогатил «северо-восточную» область карты нуклидов (рис. 3).

В овале находятся 57 наиболее нейтронообогащенных нуклидов с  $Z = 104$ –118, синтезированных в реакциях под действием  $^{48}\text{Ca}$ . Теперь самое тяжелое ядро, полученное когда-либо в лаборатории, имеет массу 294. Оно наблюдалось нами в виде двух изобар: в реакциях с мишенью из  $^{249}\text{Cf}$ , как четно-четное ядро с  $Z = 118$ ,  $N = 176$ , испытывающее  $\alpha$ -распад с  $T_{1/2} \approx 0.5$  мс, и в дальнейшем с мишенью из  $^{249}\text{Bk}$  – как нечетно-нечетное ядро с  $Z = 117$ ,  $N = 177$  и  $T_{1/2} \approx 50$  мс.

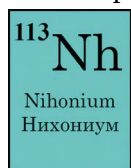
Основной вывод, который следует из экспериментальных исследований, проведенных на протяжении последних 40 лет, заключается в том, что при движении от Pb/Bi – последних стабильных элементов – в область более тяжелых нуклидов мы наблюдаем удивительную живучесть атомных ядер. Вследствие замыкания вну-

тренней (оболочечной) структуры ядерного вещества понижается энергия основного состояния тяжелого ядра, возникает барьер деления, что делает возможным существование сверхтяжелых элементов. **Фундаментальные предсказания микроскопической теории ядра о возможном существовании сверхтяжелых элементов получили прямое экспериментальное подтверждение.**

**Наименование новых элементов**

Приоритеты в открытии новых элементов с атомными номерами 113 ÷ 118 были установлены Объединенной рабочей группой экспертов, созданной совместным решением Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) и Международного союза теоретической и прикладной физики (IUPAP).

Для элемента с атомным номером 113 первооткрыватели из исследовательского центра RIKEN (Nishina Center, Japan) предложили название нихоний (nihonium) и символ Nh. Нихон (Nihon) одно из названий Японии и переводится как «Страна восходящего солнца».



Для элемента с атомным номером 114 первооткрыватели из Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), Национальной ливерморской лаборатории Лоуренса (США), Ок-Риджской национальной лаборатории (Теннесси, США) и Университета Вандербильта предложили назвать элемент с атомным номером 115 московий (moscovium, символ – Mc). Элемент с атомным номером 117 был назван теннессин (tennessine, символ – Ts). Эти наименования следуют исторической традиции называть новые химические элементы в честь географических регионов.



Первооткрыватели и давнишние партнеры из Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия) и Национальной ливерморской лаборатории Лоуренса (США) предложили название флеровий (flerovium), символ Fl для элемента с атомным номером 114 и наименование ливерморий (livermorium), символ Lv для элемента с атомным номером 116.

Наименование флеровий присвоено в честь Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флёрова – пионера в физике тяжелых ионов и основателя лаборатории, известной своими достижениями в синтезе новых элементов.

Наименование ливерморий отмечает значительный вклад ученых Национальной ливерморской лаборатории Лоуренса в совместные эксперименты по синтезу новых элементов, включая элемент 116, проводившиеся в Дубне.

Первооткрыватели из Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), Национальной ливерморской лаборатории Лоуренса (США), Ок-Риджской национальной лаборатории (Теннесси, США) и Университета Вандербильта предложили назвать элемент с атомным номером 115 московий (moscovium, символ – Mc). Элемент с атомным номером 117 был назван теннессин (tennessine, символ – Ts). Эти наименования следуют исторической традиции называть новые химические элементы в честь географических регионов.

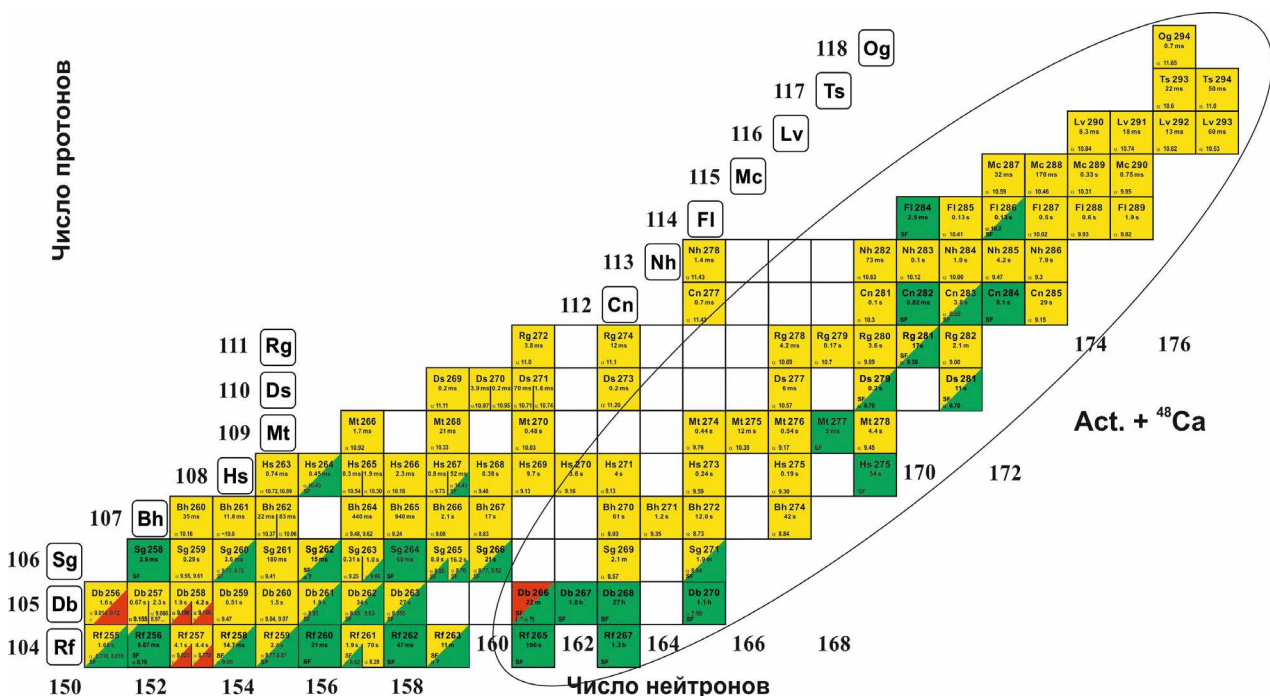
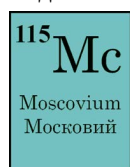


Рис. 3. Карта наиболее тяжелых изотопов; нуклиды, синтезированные в реакциях с <sup>48</sup>Ca, выделены овальным контуром. Желтым цветом выделены изотопы, испытывающие α-распад, зеленым – спонтанное деление, красным – β<sup>+</sup>-распад.

Московский прославляет древнюю русскую землю Московию – место расположения Объединенного института ядерных исследований.

**117**  
**Ts**  
Tennesseine  
Теннессиин

Наименование теннессин присвоено в честь значительного вклада в открытие сверхтяжелых элементов ученых Ок-Риджской национальной лаборатории и Университета Вандербильта и Университета Теннесси в Ноксвилле, располагающихся в Теннесси (США).

**118**  
**Og**  
Oganesson  
Оганесон

Элемент с атомным номером 118 получил свое название оганесон (oganeson, символ – Og) в честь автора настоящей статьи. Автор глубоко признателен коллегам за оказанную высокую честь и признание его вклада в синтез и исследование новых элементов.

Вместе с тем, открытие СТЭ породило также много вопросов. Могут ли существовать элементы более тяжелые, чем синтезированные СТЭ, новые ядерные оболочки и более далекие «острова»? Образуются ли СТЭ во Вселенной, в различных астрофизических сценариях нуклеосинтеза? Где располагаются СТЭ в Периодической таблице, похожи ли они на свои легкие гомологи? И, конечно, многие другие.

**Новые поселенцы в Таблице элементов**

На рис. 4 представлена Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева (версия 2016 года). Согласно расчетам, выполненным в нерелятивистском

приближении, Периодический закон работает для всех элементов от  $Z = 1$  до  $Z = 172$ . Однако при движении в область все более тяжелых элементов с увеличением заряда ядра возрастает скорость внутренних электронов, приближаясь к скорости света. Согласно теории относительности, это ведет к возрастанию полной энергии электрона (эффект роста массы), вследствие чего ожидается уменьшение радиусов внутренних оболочек тяжелых атомов.

«Релятивистское сжатие» должно приводить к изменению квантовых характеристик и энергии связи внешних электронов, ответственных за химическое поведение элемента. Поэтому, двигаясь вдоль седьмого ряда Таблицы от элементов с  $Z = 104$  к элементам с  $Z = 118$ , мы должны увидеть влияние «релятивистского эффекта» как всё возрастающее отклонение в химическом поведении СТЭ относительно своих легких гомологов.

На сегодняшний день наибольшее развитие для изучения химических свойств СТЭ с секундными временами жизни получили исследо-

The image shows a standard periodic table of elements from 1 to 118. It includes the Lanthanide and Actinide series at the bottom. Each element cell contains its atomic number, symbol, and name in both Russian and English. The table is organized into groups (IA to VIIIA) and periods (1 to 7).

Рис. 4. Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева, версия 2016 года.

вания их адсорбционного поведения на поверхности золота с использованием методов газовой хроматографии [18].

Вылетающие из облучаемой мишени продукты реакции тормозятся в среде инертных газов и транспортируются газовой струей по тонкому капилляру в детектирующий модуль с последующей адсорбцией изучаемого элемента при определенной температуре на покрытой золотом поверхности Si-полупроводниковых детекторов. Экспериментально определенное значение температуры адсорбции является ключевым параметром для расчета энтальпии адсорбции элемента на поверхности золота и заключений о его химической «активности» или «инертности».

В первых экспериментах сравнивалось поведение пары Sn/Hg [19]. Статистический анализ полученных данных позволил оценить стандартную энтальпию адсорбции 112-го элемента на поверхности золота ( $-\Delta H_{\text{адс}} = 52^{+4}_{-3}$  кДж·мол<sup>-1</sup>) и сделать вывод, что тенденция изменения свойств элементов 12-й группы сохраняется. Оценки показали, что температура кипения 112-го элемента находится в интервале от 80 до 110 °С, что заметно меньше, чем у Hg (356.8 °С).

Повышенная летучесть наблюдается также у элемента 113 в атомарном состоянии или в виде гидроксида [20]. Ситуация, однако, сильно изменилась при переходе к паре 14-й группы Fl/Pb. Согласно последним данным Дубны и Дармштадта, различие в этой паре значительно возрастает по сравнению с предыдущими случаями [21]. Элемент 114, скорее всего, является газообразным благородным металлом, в то время как Pb закипает, как известно, при 1 750 °С.

Сейчас внимание исследователей приковано к самому тяжелому элементу с  $Z = 118$ . В нерелятивистском варианте он находится в 18-й группе и является благородным газом, гомологом Rn ( $Z = 86$ ) [22].

Теперь, более чем 100 лет спустя после открытия благородных газов В. Рамзаем (Нобелевская премия, 1904), мы ищем ответ на вопрос о том, будет ли 118-й элемент благородным газом? Экстраординарные прогнозы теории нуждаются в экспериментальной проверке.

### Дальнейшие исследования и перспективы

Очевидно, что в поисках ответов на вопросы, возникшие в связи с открытием сверхтяжелых элементов, необходимо существенно пополнить наши знания о предмете исследования. Для этого, естественно, необходимо значительно расширить поле деятельности с привлечением новых средств. Однако, судя по первым попыткам, выйти за пределы области синтезированных сверхтяжелых ядер будет весьма сложно.

Прямой синтез элементов с  $Z > 118$  в реакциях слияния связан с переходом к бомбардирующим ядрам тяжелее Ca, так как возможности ядерного реактора в наработке мишенного материала ограничены производством изотопов Cf [23]. Ряд попыток, предпринятых в различных лабораториях и нацеленных на синтез 119-го и 120-го элементов, не привели к положительным результатам. Границы сечений образования ядер с  $Z = 120$  в реакции  $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$  и ядер с  $Z = 119$  в реакции  $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$  оказались по крайней мере в 10–20 раз ниже сечения образования изотопов 114–115 элементов в экспериментах с  $^{48}\text{Ca}$ .

Продвинуться в другом направлении – в желаемую область более нейтронообогащенных изотопов уже известных СТЭ и подойти ближе к оболочке  $N = 184$  можно лишь с помощью радиоактивных ионов, более нейтроноизбыточных, чем  $^{48}\text{Ca}$ . К сожалению, интенсивности пучков радиоактивных ядер даже на проектируемых сверхмощных ускорителях (например, создаваемая в Мичиганском университете установка FRIB для получения пучков ионов радиоактивных изотопов будет иметь мощность пучка 400 кВт) чрезвычайно малы для постановки подобных экспериментов.

В этих обстоятельствах кажется целесообразным детально исследовать уже синтезированные ядра: измерить их массы, формы и барьеры деления, найти возбужденные состояния и т. д. Отдельные события образования и распада сверхтяжелых нуклидов, которые сегодня регистрируются в эксперименте с частотой от 1/день до 1/месяц (что считается большим достижением последних лет), далеко не достаточны для этих целей.

Отметим, что нынешняя ситуация в некоторых аспектах повторяет начало работ по синтезу сверхтяжелых элементов 20-летней давности, когда для

достижения цели был найден новый подход к синтезу СТЭ (реакции Act. +  $^{48}\text{Ca}$ ) и сделан существенный прорыв в технике эксперимента. В последние годы экспериментальная активность несколько снизилась и новые результаты почти не появляются, так как основное внимание сейчас уделяется созданию новых ускорителей и более совершенных экспериментальных установок.

Мы пришли к выводу о том, что, опираясь на накопленные знания, можно повысить производительность известных методов синтеза изотопов СТЭ почти в 100 раз. Для этого было принято решение о создании специализированного экспериментального комплекса – «Фабрика СТЭ», которая позволит осуществить второй прорыв в мир тяжелых ядер и элементов.

#### «Фабрика сверхтяжелых элементов»

Идеи, заложенные в создание «Фабрики СТЭ», связаны с развитием экспериментальной базы будущего сразу по нескольким направлениям [21, 24]. К этим направлениям относятся:

- создание нового мощного ускорителя стабильных и долгоживущих радиоактивных изотопов;
- создание нового экспериментального корпуса и инфраструктуры для размещения собственно ускорителя и каналов транспортировки пучков в нескольких экспериментальных залах общей площадью 1000 м<sup>2</sup>, оборудованных системами контроля и защиты по 2-му классу работ с радиоактивными материалами;
- создание новых сепарирующих каналов и разработка новых детектирующих модулей для исследова-

ования ядерных, атомных и химических свойств новых элементов;

- наработка новых мишенных материалов и разработка технологий изготовления мишеней с высокой тепловой и радиационной стойкостью;
- создание базы для проведения исследований в смежных областях науки и техники.

В настоящее время (весна 2019 г.) завершено сооружение здания, введен в эксплуатацию специализированный сверхточный ускоритель тяжелых ионов ДЦ-280 и смонтирован газонаполненный сепаратор ГНС-2. На рис. 5 представлено здание «фабрики».

#### Циклотрон ДЦ-280 для «Фабрики СТЭ»

В качестве ускорителя для «Фабрики сверхтяжелых элементов» был выбран циклотрон. Принципиальные требования к ускорителю приведены в таблице 1.

В соответствии с требованиями к параметрам ускорителя были определены основные параметры циклотрона ДЦ-280 (параметр «280» означает максимальную энергию, до которой могут быть ускорены протоны) [25].



Рис. 5. Здание экспериментального комплекса «Фабрика сверхтяжелых элементов».



Таблица 1. Требования к параметрам ускорителя

Параметры ускорителя	Диапазон величин
Энергии ионов, МэВ/нуклон	4–8
Массы ионов, а.е.м.	10–238
Интенсивность пучков (до массового числа $A = 50$ ), $c^{-1}$	$10^{14}$
Эмиттанс ускоренного пучка, мм-мрад	$< 30\pi$
Эффективность трансмиссии пучка ионный источник – мишень, %	$> 50$

На рис. 6 представлен вид циклотрона ДЦ-280 в зале «фабрики».

Электромагнит ДЦ-280 с диаметром полюса 4 м имеет вес около 1000 т и предназначен для создания магнитного поля в диапазоне 0.6–1.3 Тл. Над магнитом на платформах высоковольтной инжекции располагаются ЭЦР-источники ионов.

В циклотроне применяется дополнительная «Flat-top» система, предназначенная для создания плоской формы вершины ускоряющего напряжения и позволяющая значительно повысить эффективность ускорения.

Вывод ускоренных ионов из ускорителя осуществляется электростатическим методом. Далее с помощью распределительного магнита пучки ионов могут быть поданы по одному из пяти направлений в кабины к экспериментальным установкам.

В январе 2019 года в ускорителе ДЦ-280 был получен первый пучок ускоренных ионов криптона с зарядом +14. Этот ион был выбран для тестовых экспериментов, поскольку не приводит к высокой активации элементов циклотрона. Интенсивность выведенного пучка перед распределительным магнитом достигала  $10^{13} c^{-1}$ , прохождение пучка от источника ионов превышало 30%.

#### Газонаполненный сепаратор ГНС-2

Необходимыми условиями изучения тяжелых и сверхтяжелых ядер, образовавшихся в реакциях полного слияния налетающего иона с ядром-мишенью, являются их отделение от бомбардирующих частиц пучка (а также от продуктов побочных реакций, интенсивность которых выше на 10–15 порядков) и эффективная транспортировка к детектирующим устройствам.

Как показал многолетний опыт эксплуатации сепаратора ГНС-1 и сравнение характеристик «вакуумных» (например, фильтр скоростей SHIP [26], электростатический сепаратор ВАСИЛИСА [27]) и газонаполненных сепараторов, в экспериментах

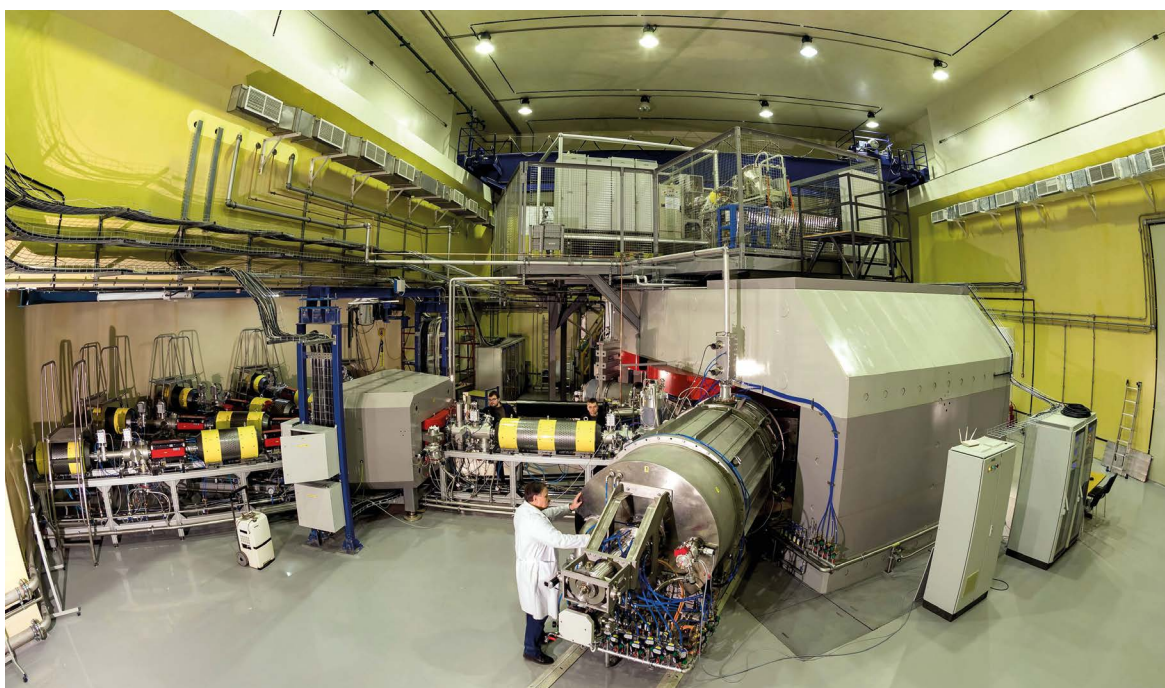


Рис. 6. Циклотрон ДЦ-280 в зале «фабрики».

по синтезу и изучению свойств СТЭ следует отдать предпочтение газонаполненным установкам.

Для «Фабрики СТЭ» был разработан газонаполненный сепаратор ГНС-2 [28]. По сравнению с предыдущей версией новый сепаратор имеет более совершенную ионно-оптическую схему, и его параметры были оптимизированы для синтеза СТЭ в реакциях полного слияния. На *рис. 7* представлен вид сепаратора ГНС-2 в экспериментальном зале «фабрики».

В настоящее время (весна 2019 г.) монтаж сепаратора завершен и начаты пуско-наладочные работы. Согласно расчетам, новый сепаратор должен обеспечивать в два раза более высокую трансмиссию СТЭ к детекторам, более высокое подавление фоновых продуктов.

### Первые эксперименты на «фабрике»

Тестирование ускорителя, систем диагностики, транспорта пучков и радиационной обстановки, сепаратора, детекторов и систем сбора и обработки данных должно завершиться к осени 2019 г. После этого на «фабрике» будут начаты эксперименты по синтезу и изучению свойств СТЭ.

В качестве первых шагов планируется изучение образования и свойств известных изотопов флоревия в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  и изотопов московия в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$ . Сечения образования этих изотопов составляют примерно 10 пб, что позволит наблюдать 10 и более событий в день.

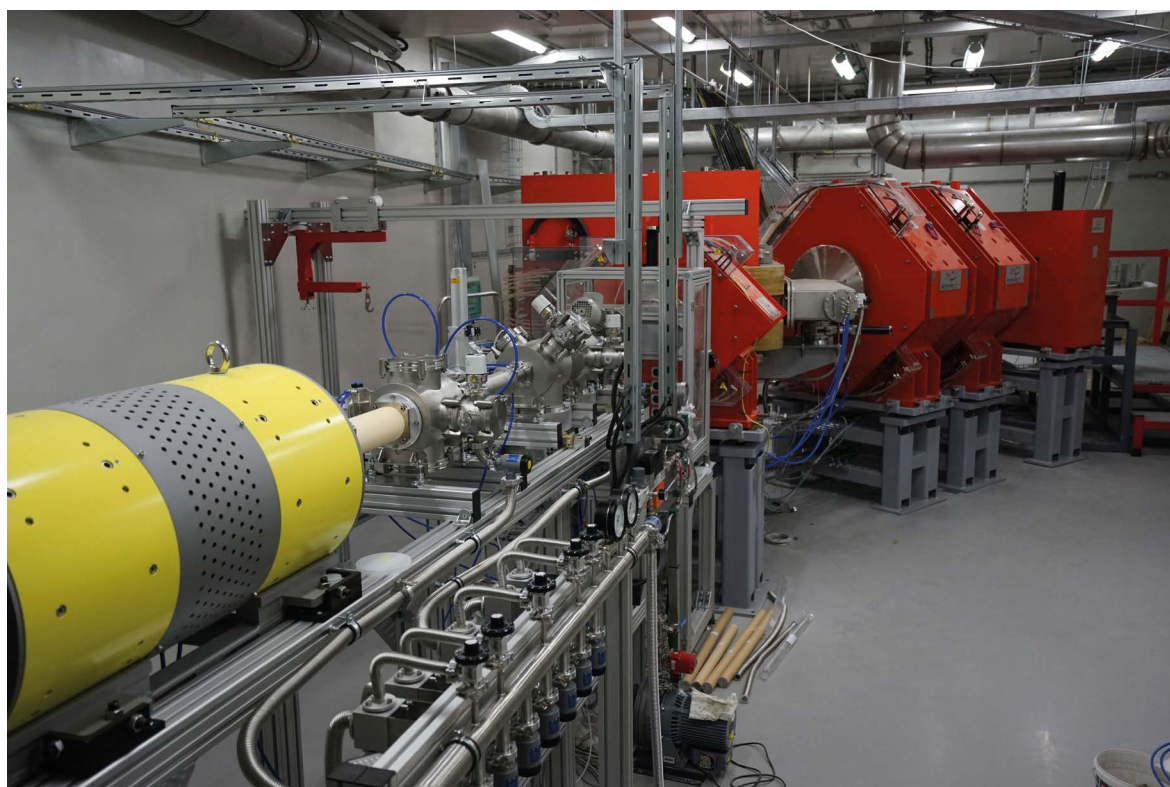
Эти эксперименты нацелены не только на тестирование всего экспериментального комплекса, но и на получение новой информации о свойствах изотопов, например, о наличии изомерных состояний, детального изучения функции возбуждения с испарением различных чисел нейтронов.

И, наконец, следующим шагом будут эксперименты по синтезу элементов 119 и 120 в реакциях  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$  и  $^{50}\text{Ti} + ^{249-251}\text{Cf}$ .

В предыдущих попытках синтеза этих элементов была достигнута граница вероятности их образования на уровне менее одного события в месяц. При тех же предположениях о сечениях реакций на новом экспериментальном комплексе мы можем ожидать более одного события образования новых элементов в неделю. Очевидно, что эксперименты по синтезу элементов 119 и 120 потребуют длительной, возможно на протяжении нескольких лет, работы.

### Заключение

«Фабрика СТЭ» не имеет аналога в мировой практике. Она создается



*Рис. 7. Сепаратор ГНС-2 в экспериментальном зале «фабрики».*

с перспективой на 20–25 лет и должна быть востребованной в качестве экспериментального комплекса, обеспечивающего лидирующие позиции в науке о тяжелых и сверхтяжелых элементах.

В заключение автор и коллеги по работе выражают глубокую благодарность Российскому фонду фунда-

ментальных исследований не только за финансовую поддержку, но и за постоянный интерес к проблеме сверхтяжелых элементов и полезные дискуссии при обсуждении результатов.

Автор пользуется случаем поздравить своих коллег, работающих в области синтеза и изучения свойств СТЭ, и всех людей, интересующихся этой проблемой, с Международным годом Периодической таблицы элементов.

## Литература

- R.C. Barber, N.N. Greenwood, A.Z. Hrynkiewicz, Y.P. Jeamin, M. Lefort, M. Sakai, I. Uehla, A.H. Wapstra, D.H. Wilkinson *Pure & Appl. Chem.*, 1993, **65**(8), 1757. DOI: 10.1351/pac199365081757.
- A. Sobiczewski, F.A. Gareev, B.N. Kalinkin *Phys. Lett.*, 1966, **22**(4), 500.
- R.D. Loss, J. Corish *Pure & Appl. Chem.*, 2012, **84**(7), 1669. DOI: 10.1351/PAC-REC-11-12-03.
- L. Öhrström, J. Reedijk *Pure & Appl. Chem.*, 2016, **88**(12), 1225. DOI: 10.1515/pac-2016-0501.
- N. Bohr, J.A. Wheeler *Phys. Rev.*, 1939, **56**, 426.
- К.А. Петржак, Г.Н. Флеров *ЖЭТФ*, 1940, **10**(9–10), 1013.
- С.М. Поликанов, В.А. Друин, В.А. Карнаухов, В.Л. Михеев, А.А. Плева, Н.К. Скобелев, В.Г. Субботин, Г.М. Тер-Акопян, В.А. Фомичев *ЖЭТФ*, 1962, **42**(6), 1464.
- R. Smolańczuk, J. Skalski, A. Sobiczewski *Phys. Rev.*, 1995, **C 52**(4), 1871. DOI: 10.1103/PhysRevC.52.1871.
- A. Sobiczewski, K. Pomorski *Prog. Part. Nuc. Phys.*, 2007, **58**(1), 292. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2006.05.001.
- G.M. Ter-Akopian, S.N. Dmitriev *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 177. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.09.004.
- A. Ghiorso, J.M. Nitschke, J.R. Alonso, M. Nurmia, G.T. Seaborg, E.K. Hulet., R.W. Louheed *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**(25), 1490.
- Ю.Ц. Оганесян, Ю.П. Третьяков, А.С. Ильинов, А.Г. Демин, А.А. Плева, С.П. Третьякова, В.М. Плотко, М.П. Иванов, Н.А. Данилов, Ю.С. Короткин, Г.Н. Флеров *Письма ЖЭТФ*, 1974, **20**(8), 580.
- S. Hofmann *Prog. Part. Nuc. Phys.*, 2009, **62**, 337. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2008.05.008.
- K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, K. Ozeki, Y. Kudou, T. Sumita, Y. Wakabayashi, A. Yoneda, K. Tanaka, S. Yamaki, R. Sakai, T. Akiyama, S. Goro, H. Hasebe, M. Huang, T. Huang, E. Ideguchi, Y. Kasamatsu, K. Katori, Y. Kariya, H. Kikumaga, H. Koura, H. Kudo, A. Mashiko, K. Mayama, S. Mitsuoka, T. Moriya, M. Murakami, H. Murayama, S. Namai, A. Ozawa, N. Sato, K. Sueki, M. Takeyajma, F. Tokanai, T. Yamaguchi, A. Yoshida *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2012, **81**, 103201. DOI: 10.1143/JPSJ.81.103201.
- Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Yu. V. Lobanov, F.Sh. Abdullin, A.N. Polyakov, I.V. Shirokovsky, Yu. S. Tsyganov, G.G. Gulbekian, S.L. Bogomolov, B.N. Gikal, A.N. Mezentsev, S. Iliev, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, O.V. Ivanov, G.V. Buklanov, K. Subotic, M.G. Itkis, K.J. Moody, J.F. Wild, N.J. Stoyer, M.A. Stoyer, R.W. Lougheed *Phys. Rev.*, 2000, **C62**, 041604. DOI: 10.1103/PhysRevC.62.041604.
- Yu. Ts. Oganessian, Yu. V. Lobanov, A.G. Popeko, F.Sh. Abdullin, G.G. Gulbekyan, Yu.P. Kharitonov, A.A. Ledovskoy, S.P. Tretyakova, Yu. S. Tsyganov, V.E. Zhuchko *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 1992, **132**(4), 429.
- Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 62. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003.
- R. Eichler, N.V. Aksenov, A.V. Belozero, G.A. Bozhikov, V.I. Chepigina, S.N. Dmitriev, R. Dressler, H.W. Gäggeler, V.A. Gorshkov, F. Haenssler, M.G. Itkis, A. Laube, V.Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O.V. Petrushkin, D. Piguet, P. Rasmussen, S.V. Shishkin, A.V. Shutov, A.I. Svirikhin, E.E. Tereshatov, G.K. Vostokin, M. Wegrzecki, A.V. Yeregin *Nature*, 2007, **447**(3), 73. DOI: 10.1038/nature05761.
- R. Eichler, N.V. Aksenov, A.V. Belozero, G.A. Bozhikov, V.I. Chepigina, S.N. Dmitriev, R. Dressler, H.W. Gäggeler, A.V. Gorshkov, M.G. Itkis, F. Haenssler, A. Laube, V.Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O.V. Petrushkin, D. Piguet, A.G. Popeko, P. Rasmussen, S.V. Shishkin, A.A. Serov, A.V. Shutov, A.I. Svirikhin, E.E. Tereshatov, G.K. Vostokin, M. Wegrzecki, A.V. Yeregin *Angew. Chem.*, 2008, **47**, 3262. DOI: 10.1002/anie.200705019.
- S.N. Dmitriev, N.V. Aksenov, Yu. V. Albin, G.A. Bozhikov, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigina, R. Eichler, A.V. Isaev, D.E. Katrasev, V.Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, O.V. Petrushkin, L.S. Porobanuk, M.A. Ryabinin, A.V. Sabelnikov, E.A. Sokol, A.V. Svirikhin, G.Ya. Starodub, I. Usoltsev, G.K. Vostokin, A.V. Yeregin *Mendeleev Comm.*, 2014, **24**, 253. DOI: 10.1016/j.mencom.2014.09.
- Ю.Ц. Оганесян, С.Н. Дмитриев *Успехи Химии*, 2016, **85**(9), 901. DOI: 10.1070/RCR4607?locatt=label:RUSSIAN.
- A. Türler, R. Eichler, A. Yakushev *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 640. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.09.012.
- N.T. Brewer, V.K. Utyonkov, K.P. Rykaczewski, Yu. Ts. Oganessian, F.Sh. Abdullin, R.A. Boll, D.J. Dean, S.N. Dmitriev, J.G. Ezold, L.K. Felker, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, N.D. Kovrizhnykh, D.C. McInturff, K. Miernik, G.D. Owen, A.N. Polyakov, A.G. Popeko, J.B. Roberto, A.V. Sabelnikov, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, N.J. Sims, E.H. Smith, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.I. Svirikhin, Yu. S. Tsyganov, S.M. Van Cleve, A.A. Voinov, G.K. Vostokin, C.S. White, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer *Phys. Rev.*, 2018, **C 98**, 024317. DOI: 10.1103/PhysRevC.98.024317.
- S. Dmitriev, M. Itkis, Yu. Oganessian *EPJ Web of Conf.*, 2016, **131**, 08001. DOI: 10.1051/epjconf/201613108001.
- G.G. Gulbekian, S.N. Dmitriev, Yu. Ts. Oganessian, B.N. Gikal, I.V. Kalagin, V.A. Semin, S.L. Bogomolov, I.A. Ivanenko, N.Yu. Kazarinov, G.N. Ivanov, N.F. Osipov *Phys. Part. Nuc. Lett.*, 2018, **15**(7), 809. DOI: 10.1134/S1547477118070373.
- G. Münnenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbrustaer *Nucl. Instr. Meth.*, 1979, **161**, 65.
- A.V. Yeregin, A.N. Andreev, D.D. Bogdanov, G.M. Ter-Akopian, V.I. Chepigina, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, S. Sharo, E.N. Voronkov, A.V. Taranenko, A.Yu. Lavrentjev *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 1994, **A350**, 608.
- A.G. Popeko *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 2016, **B376**, 144. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.025.

English

## Synthesis and Study of the New Superheavy Elements of D.I. Mendeleev Periodic Table of the Elements

*Yuri Ts. Oganessian*

Academician, Professor

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions

International Intergovernmental Organization

Joint Institute for Nuclear Research

6, Joliot-Curie Str., Dubna, 141980, Russia

oganessian@jinr.ru

### Abstract

In the sixties of the XX century, the possibility of existence of the region of increased stability of superheavy nuclei in the vicinity of  $Z \approx 114$  and  $N \approx 184$  was proved. For the first time a successful synthesis of superheavy elements was carried out in the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR). Superheavy elements of D.I. Mendeleev Periodic Table of the Elements with atomic numbers 114–118 were synthesized in the fusion reactions of the nuclei of the transuranic elements with calcium-48 nuclei.

The article deals with the choice of reactions for the synthesis of new elements, methods of studying their nuclear-physical and chemical properties. The experimental complex “Factory of superheavy elements” created in JINR and prospects of further research development are described.

**Keywords:** D.I. Mendeleev Periodic Table of the Elements, superheavy elements, heavy ion accelerators, separators of nuclear reaction products.

### Images & Tables



Fig. 1. Heavy ion accelerator U-400 of Flerov Laboratory of Nuclear Reactions JINR.

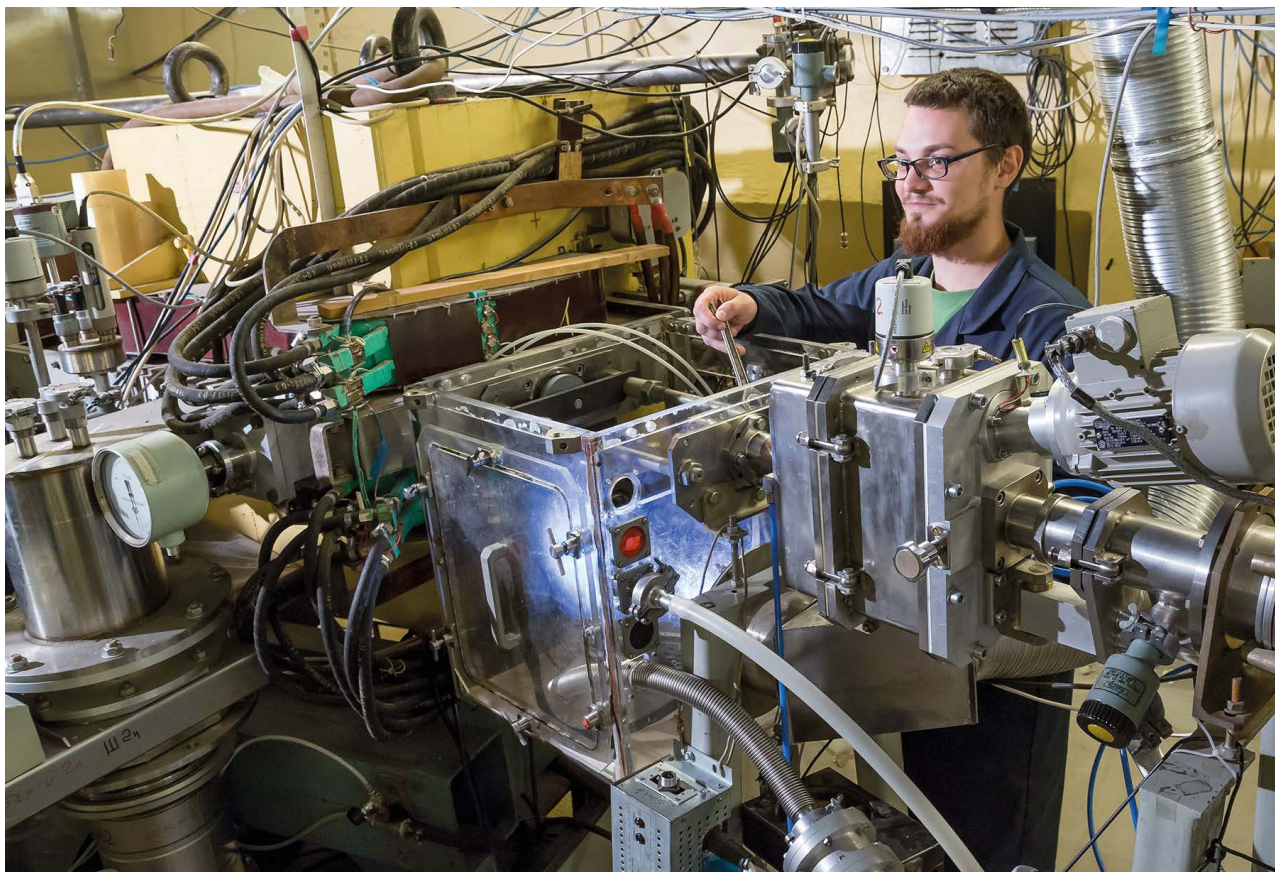


Fig. 2. Gas-filled separator GFS-1.

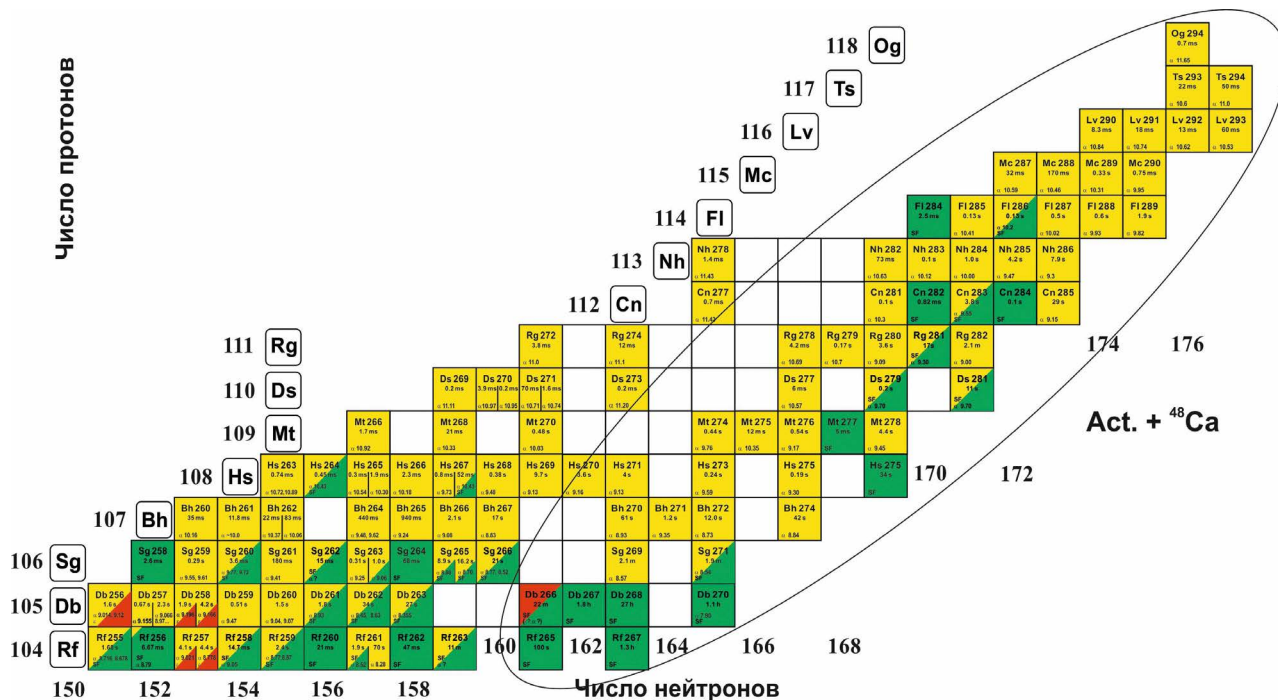


Fig. 3. Map of the heaviest isotopes; nuclides synthesized in reactions with  $^{48}\text{Ca}$ , are shown inside the oval. Yellow-shaded isotopes are experiencing  $\alpha$ -decay, green – spontaneous fission, red –  $\beta^-$ -decay.

1																		18																						
IA																		VIII A																						
H 1.00794 Hydrogen																		He 4.0026 Helium																						
3			4															13		14	15	16	17	2																
Li 6.941 Lithium			Be 9.01218 Beryllium															B 10.811 Boron	C 12.011 Carbon	N 14.0067 Nitrogen	O 15.9994 Oxygen	F 18.9984 Fluorine	Ne 20.1797 Neon																	
11																		12															13		14	15	16	17	18	
Na 22.989769 Sodium																		Mg 24.3050 Magnesium															Al 26.981539 Aluminum	Si 28.0855 Silicon	P 30.97376 Phosphorus	S 32.06 Sulfur	Cl 35.453 Chlorine	Ar 39.948 Argon		
19																		20															31		32	33	34	35	36	
K 39.0983 Potassium																		Ca 40.078 Calcium															Ga 69.723 Gallium	Ge 72.61 Germanium	As 74.92159 Arsenic	Se 78.96 Selenium	Br 79.904 Bromine	Kr 83.80 Krypton		
37																		38															49		50	51	52	53	54	
Rb 85.4678 Rubidium																		Sr 87.62 Strontium															In 114.818 Indium	Sn 118.710 Tin	Sb 121.757 Antimony	Te 127.60 Tellurium	I 126.90547 Iodine	Xe 131.29 Xenon		
55																		56															81		82	83	84	85	86	
Cs 132.90545 Cesium																		Ba 137.327 Barium															Tl 204.387 Thallium	Pb 207.2 Lead	Bi 208.98037 Bismuth	Po [209] Polonium	At [210] Astatine	Rn [222] Radon		
87																		88															113		114	115	116	117	118	
Fr [223] Francium																		Ra 226.025 Radium															Nh [284] Nihonium	Fl [287] Flerovium	Mc [288] Moscovium	Lv [291] Livermorium	Ts [293] Tennessine	Og [294] Oganesson		

Лантаноиды Lanthanides																																											
Ce 140.12 Calcium																		Pr 140.90768 Praseodymium		Nd 144.24 Neodymium		Pm [145] Promethium		Sm 150.36 Samarium		Eu 151.965 Europium		Gd 157.25 Gadolinium		Tb 158.92534 Terbium		Dy 162.50 Dysprosium		Ho 164.93032 Holmium		Er 167.25 Erbium		Tm 168.93421 Thulium		Yb 173.04 Ytterbium		Lu 174.967 Lutetium	
Актиноиды Actinides																																											
Th 232.0377 Thorium																		Pa 231.03688 Protactinium		U 238.02891 Uranium		Np [237] Neptunium		Pu [244] Plutonium		Am [243] Americium		Cm [247] Curium		Bk [247] Berkelium		Cf [251] Californium		Es [252] Einsteinium		Fm [257] Fermium		Md [258] Mendelevium		No [259] Nobelium		Lr [262] Lawrencium	

Fig. 4. D.I. Mendeleev's Periodic Table of the elements, version of 2016.



Fig. 5. The building of the experimental complex "Factory of superheavy elements" (SHE-factory).

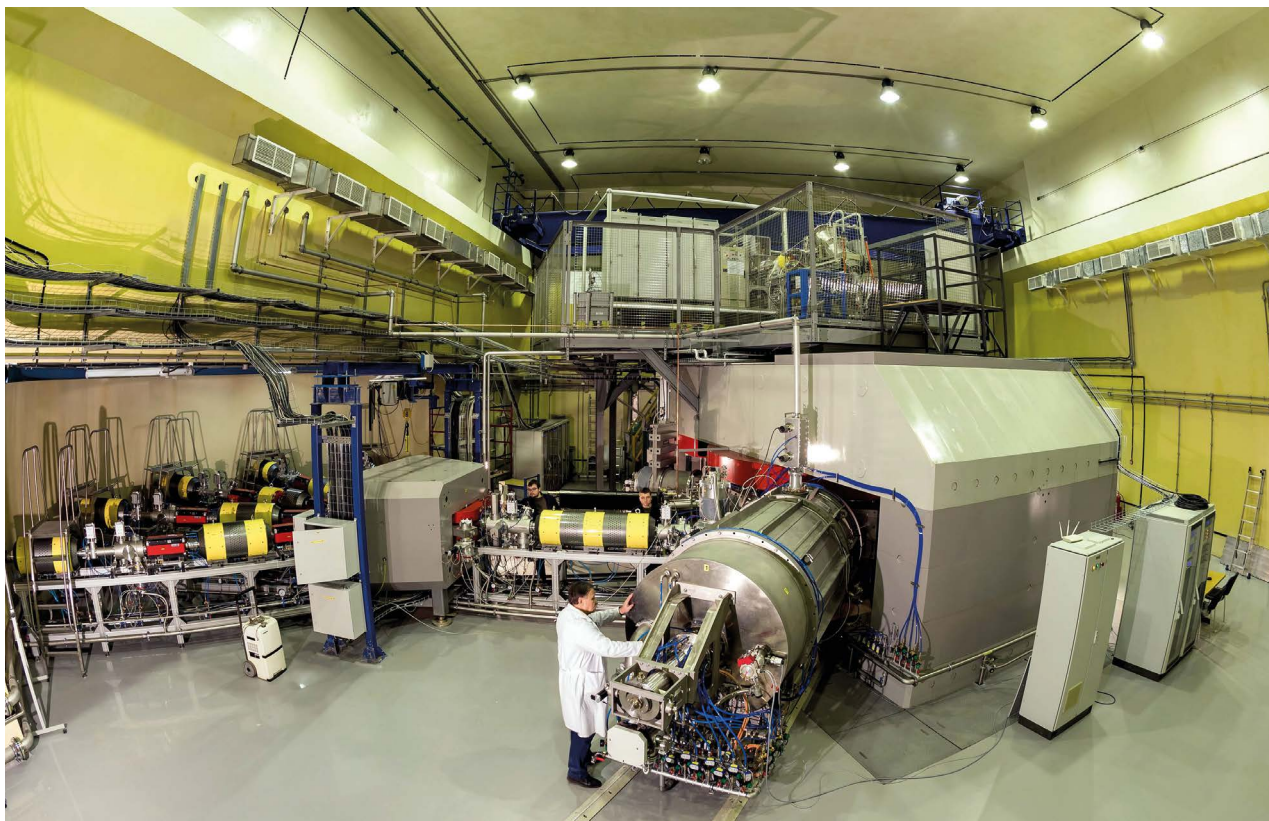


Fig. 6. Cyclotron DC-280 in the hall of the SHE-factory.

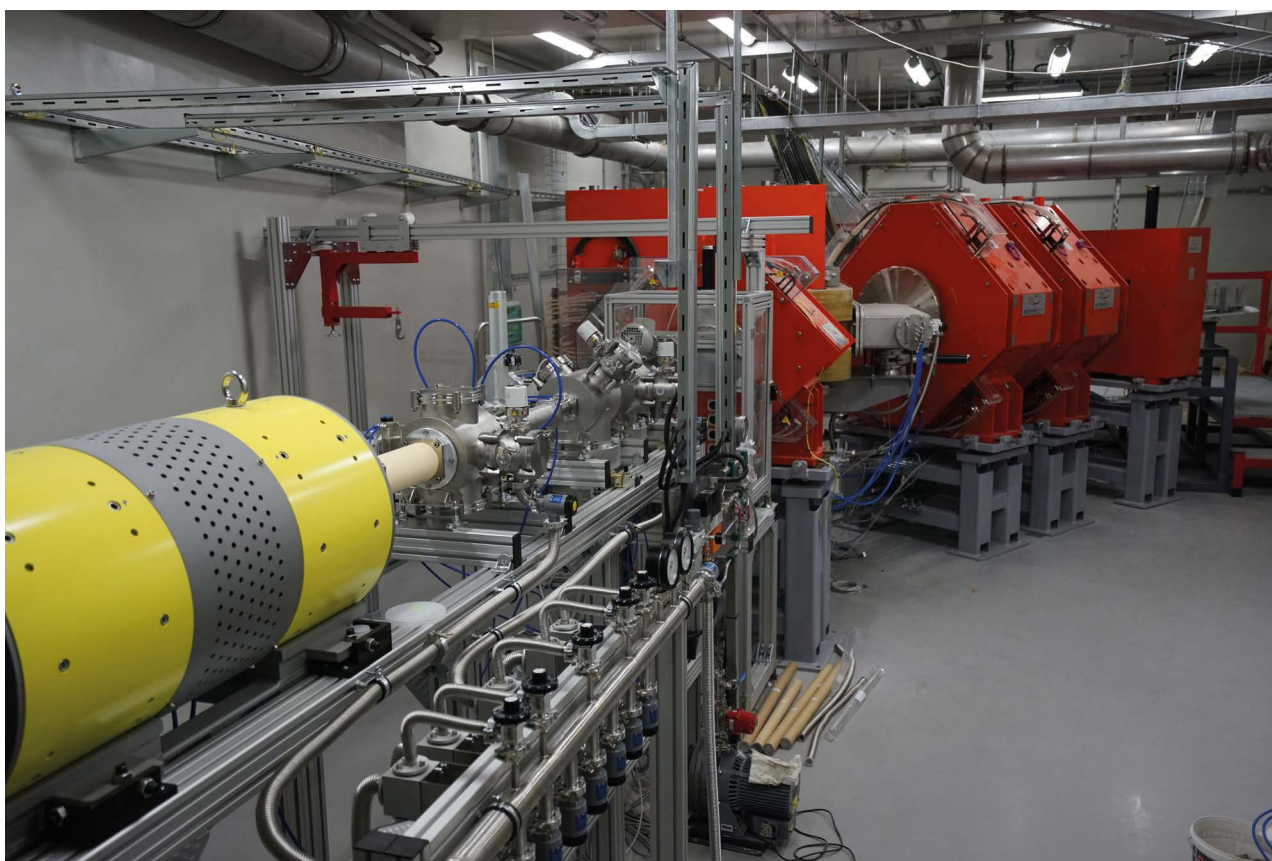


Fig. 7. Gas-filled separator GFS-2 in the experimental hall.

## References

1. R.C. Barber, N.N. Greenwood, A.Z. Hrynkiewicz, Y.P. Jeannin, M. Lefort, M. Sakai, I. Uehla, A.H. Wapstra, D.H. Wilkinson *Pure & Appl. Chem.*, 1993, **65**(8), 1757. DOI: 10.1351/pac199365081757.
2. A. Sobiczewski, F.A. Gareev, B.N. Kalinkin *Phys. Lett.*, 1966, **22**(4), 500.
3. R.D. Loss, J. Corish *Pure & Appl. Chem.*, 2012, **84**(7), 1669. DOI: 10.1351/PAC-REC-11-12-03.
4. L. Öhrström, J. Reedijk *Pure & Appl. Chem.*, 2016, **88**(12), 1225. DOI: 10.1515/pac-2016-0501.
5. N. Bohr, J.A. Wheeler *Phys. Rev.*, 1939, **56**, 426.
6. K.A. Petrzhak, G.N. Flerov *JETP*, 1940, **10**(9-10), 1013 (in Russian).
7. S.M. Polikanov, V.A. Druin, V.A. Karnaukhov, V.L. Mikheev, A.A. Pleve, N.K. Skobelev, V.G. Subbotin, G.M. Ter-Akopyan, V.A. Fomichev *JETP*, 1962, **42**(6), 1464 (in Russian).
8. R. Smolaczuk, J. Skalski, A. Sobiczewski *Phys. Rev.*, 1995, **C 52**(4), 1871. DOI: 10.1103/PhysRevC.52.1871.
9. A. Sobiczewski, K. Pomorski *Prog. Part. Nuc. Phys.*, 2007, **58**(1), 292. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2006.05.001.
10. G.M. Ter-Akopian, S.N. Dmitriev *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 177. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.09.004.
11. A. Ghiorso, J.M. Nitschke, J.R. Alonso, M. Nurmia, G.T. Seaborg, E.K. Hulet, R. W. Louheed *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**(25), 1490.
12. Yu. Ts. Oganessian, Yu. P. Tretyakov, A. S. Ilinov, A. G. Demin, A. A. Pleve, S. P. Tretyakova, V. M. Plotko, M. P. Ivanov, N. A. Danilov, Yu. S. Korotkin, G. N. Flerov *JETP Letters*, 1974, **20**(8), 265 ([http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1791/article\\_27348.pdf](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1791/article_27348.pdf)).
13. S. Hofmann *Prog. Part. Nuc. Phys.*, 2009, **62**, 337. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2008.12.008.
14. K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, K. Ozeki, Y. Kudou, T. Sumita, Y. Wakabayashi, A. Yoneda, K. Tanaka, S. Yamaki, R. Sakai, T. Akiyama, S. Goro, H. Hasebe, M. Huang, T. Huang, E. Ideguchi, Y. Kasamatsu, K. Katori, Y. Kariya, H. Kikunaga, H. Koura, H. Kudo, A. Mashiko, K. Mayama, S. Mitsuoka, T. Moriya, M. Murakami, H. Murayama, S. Namai, A. Ozawa, N. Sato, K. Sueki, M. Takeyama, F. Tokana, T. Yamaguchi, A. Yoshida *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2012, **81**, 103201. DOI: 10.1143/JPSJ.81.103201.
15. Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Yu. V. Lobanov, F. Sh. Abdullin, A.N. Polyakov, I.V. Shirokovsky, Yu. S. Tsyganov, G.G. Gulbekian, S.L. Bogomolov, B.N. Gikal, A.N. Mezentsev, S. Iliev, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, O.V. Ivanov, G.V. Buklanov, K. Subotic, M.G. Itkis, K.J. Moody, J.F. Wild, N.J. Stoyer, M.A. Stoyer, R.W. Lougheed *Phys. Rev.*, 2000, **C62**, 041604. DOI: 10.1103/PhysRevC.62.041604.
16. Yu. Ts. Oganessian, Yu. V. Lobanov, A.G. Popeko, F. Sh. Abdullin, G.G. Gulbekyan, Yu. P. Kharitonov, A.A. Ledovskoy, S.P. Tretyakova, Yu. S. Tsyganov, V.E. Zhuchko *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 1992, **132**(4), 429.
17. Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 62. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003.
18. R. Eichler, N.V. Aksenov, A.V. Belozero, G.A. Bozhikov, V.I. Chepigina, S.N. Dmitriev, R. Dressler, H.W. Gäggeler, V.A. Gorshkov, F. Haenssler, M.G. Itkis, A. Laube, V. Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O.V. Petrushkin, D. Piguet, P. Rasmussen, S.V. Shishkin, A.V. Shutov, A.I. Svirikhin, E.E. Tereshatov, G.K. Vostokin, M. Wegrzecki, A.V. Yeremin *Nature*, 2007, **447**(3), 73. DOI: 10.1038/nature05761.
19. R. Eichler, N.V. Aksenov, A.V. Belozero, G.A. Bozhikov, V.I. Chepigina, S.N. Dmitriev, R. Dressler, H.W. Gäggeler, A.V. Gorshkov, M.G. Itkis, F. Haenssler, A. Laube, V. Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O.V. Petrushkin, D. Piguet, A.G. Popeko, P. Rasmussen, S.V. Shishkin, A.A. Serov, A.V. Shutov, A.I. Svirikhin, E.E. Tereshatov, G.K. Vostokin, M. Wegrzecki, A.V. Yeremin *Angew. Chem.*, 2008, **47**, 3262. DOI: 10.1002/anie.200705019.
20. S.N. Dmitriev, N.V. Aksenov, Yu. V. Albin, G.A. Bozhikov, M.L. Chelnokov, V.I. Chepygin, R. Eichler, A.V. Isaev, D.E. Katrasev, V. Ya. Lebedev, O.N. Malyshev, O.V. Petrushkin, L.S. Porobanuk, M.A. Ryabinin, A.V. Sabelnikov, E.A. Sokol, A.V. Svirikhin, G. Ya. Starodub, I. Usoltsev, G.K. Vostokin, A.V. Yeremin *Mendeleev Comm.*, 2014, **24**, 253. DOI: 10.1016/j.mencom.2014.09.
21. Yu Ts Oganessian, S N Dmitriev *Russ. Chem. Rev.*, 2016, **85** (9), 901. DOI: 10.1070/RCR4607.
22. A. Türler, R. Eichler, A. Yakushev *Nucl. Phys.*, 2015, **A944**, 640. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.09.012.
23. N.T. Brewer, V.K. Utyonkov, K.P. Rykaczewski, Yu. Ts. Oganessian, F. Sh. Abdullin, R.A. Boll, D.J. Dean, S.N. Dmitriev, J.G. Ezold, L.K. Felker, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, N.D. Kovrizhnykh, D.C. McInturff, K. Miernik, G.D. Owen, A.N. Polyakov, A.G. Popeko, J.B. Roberto, A.V. Sabelnikov, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, N.J. Sims, E.H. Smith, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.I. Svirikhin, Yu.S. Tsyganov, S.M. Van Cleve, A.A. Voinov, G.K. Vostokin, C.S. White, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer *Phys. Rev.*, 2018, **C 98**, 024317. DOI: 10.1103/PhysRevC.98.024317.
24. S. Dmitriev, M. Itkis, Yu. Oganessian *EPJ Web of Conf.*, 2016, **131**, 08001. DOI: 10.1051/epjconf/201613108001.
25. G.G. Gulbekian, S.N. Dmitriev, Yu. Ts. Oganessian, B.N. Gikal, I.V. Kalagin, V.A. Semin, S.L. Bogomolov, I.A. Ivanenko, N.Yu. Kazarinov, G.N. Ivanov, N.F. Osipov *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2018, **15**(7), 809. DOI: 10.1134/S1547477118070373.
26. G. Müntzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster *Nucl. Instr. Meth.*, 1979, **161**, 65.
27. A.V. Yeremin, A.N. Andreev, D.D. Bogdanov, G.M. Ter-Akopian, V.I. Chepigina, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, S. Sharo, E.N. Voronkov, A.V. Taranenko, A.Yu. Lavrentjev *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 1994, **A350**, 608.
28. A.G. Popeko *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 2016, **B376**, 144. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.025.



## Таблица Менделеева и морские биомолекулы

В.А. Стоник, Т.Н. Макарьева

В представленном мини-обзоре рассматривается включение ряда элементов таблицы Менделеева в морские природные соединения и их участие в жизнедеятельности морских организмов. Обсуждаются накопление морскими беспозвоночными отдельных металлов и образование комплексных соединений металлов с различными по химической структуре вторичными метаболитами. Кроме того, рассматриваются примеры образования ковалентных связей в биомолекулах морского происхождения с рядом неметаллов.

**Ключевые слова:** морские организмы, морские метаболиты, металлы, неметаллы, комплексоны, элементоорганические биомолекулы.

Многие элементы таблицы Менделеева играют важную роль в живых системах. Морские организмы (а, в своем большинстве, их основные таксономические группы появились на нашей планете сотни миллионов лет назад) используют ионы металлов в различных биохимических процессах, а некоторые при этом образующиеся соединения, по-видимому, и при химических взаимодействиях друг с другом. Они могут включать в свои биомолекулы другие элементы, в особенности галогены и серу, присоединяя их ковалентными связями к атомам углерода или кислорода и тем самым усиливая биологическую активность и растворимость в воде своих метаболитов.

Хорошо известно, что ионы натрия, калия, магния и кальция регулируют осмотический баланс клеток и участвуют в формировании важных полисахаридных и белковых биоматериалов во всех живых организмах. С другой стороны, ионы переходных металлов, в том числе редких, необходимы для функционирования металлоферментов и различных кофакторов [1]. Не только морские биополимеры, но и низко-

молекулярные морские вторичные метаболиты избирательно связывают различные элементы, причем во многих случаях механизмы аккумуляции этих элементов с помощью таких соединений остаются не вполне ясными, а только предполагаемыми на основе особенностей их строения [2]. В целом морские биомолекулы включают не менее 40 элементов периодической таблицы Менделеева. В их числе не только широко представленные во многих метаболитах наземного происхождения натрий, калий, кальций, магний, железо и цинк, но и марганец, ванадий, медь, никель, кобальт, молибден, олово, свинец, хром, титан, кадмий, ниобий, уран, цирконий, рутений, а из неметаллов, кроме водорода, кислорода, азота и фосфора, еще и фтор, хлор, бром, йод, селен, сера, мышьяк.

### Связывание ионов металлов биополимерами морских организмов

Организмы представителей морской биоты, в особенности морских беспозвоночных, часто значительно обогащены ионами металлов по сравнению с окружающей их средой. Так, почти сто лет назад были обнаружены высокие концентрации ванадия в асцидиях [2, 3]. В некоторых из них его содержание было в десять и более миллионов раз выше, чем в морской воде. Высокая концентрация ванадия была отмечена в клетках крови этих животных. Допускали, что комплексоны, связывающими ванадий, являются их необычные низкомолекулярные метаболиты, например туникохром-1, но позже было выяснено, что туникохромы не присутствуют



**Стоник Валентин Аронович**  
профессор,  
научный руководитель Тихоокеанского института  
биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН



**Макарьева Татьяна Николаевна**  
Тихоокеанский институт биоорганической  
химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН

в кровяных клетках. Затем были найдены пептиды-ванабины с молекулярными массами около 10.5 кДа и девятью дисульфидными связями, эти соединения содержатся в клетках крови асцидий – ванадоцитах. Ионы ванадия, содержание которых в морской воде в виде  $V^{5+}$  составляет приблизительно 35 нМ/л, проникают в ванадоциты с помощью транспортного белка, а затем восстанавливаются никотинамидадениндинуклеотидфосфатом (НАДФ) до  $V^{4+}$  и связываются с ванабином 2. Ванабин 2 способен присоединять 24 иона ванадия на одну его молекулу за счет образования координационных связей с атомами азота аминокрупп лизиновых, аргининовых и гистидиновых аминокислотных остатков этого белка. Другие ванабины могут хелатировать  $V^{5+}$  и облегчают его восстановление НАДФ. Затем ванабин 2 переносит  $V^{4+}$  к вакуоле ванадоцита, исполняя роль цитоплазматического транспортера. Еще один транспортный белок переносит ионы ванадия в вакуоль, где он восстанавливается до состояния  $V^{3+}$ . В вакуолях ванадоцитов поддерживается экстремально низкое значение pH (около 1.9) за счет образования в них значительных количеств серной кислоты. Таким образом, ионы  $V^{3+}$  находятся в этих клетках вместе с протонами и сульфат-анионами (рис. 1). Содержание ванадия в вакуолях ванадоцитов достигает 350 нМ [4]. Хотя и предполагали, что ванадий необходим ванадоцитам для регуляции кислородного обмена в организмах этих беспозвоночных и для защиты обычно неподвижных асцидий от обрастания [5, 6], с функциональной точки зрения феномен накопления ванадия ванадоцитами все еще остается во многом загадочным [4].

Разные виды асцидий, собранных на Большом Барьерном Рифе, накапливали олово, марганец, титан, хром, железо, ниобий, тантал, причем наивысшие факторы накопления были отмечены для железа ( $1.6 \times 10^7$ ) и марганца ( $2.2 \times 10^6$ ). Другие металлы, например кадмий и уран, также были найдены в асцидиях, но факторы их накопления были определены как значительно более низкие. Некоторые губки, например *Crambe crambe*, аккумулируют свинец, медь, кадмий, цинк и другие металлы [2]. Целый ряд металлов накапливается морскими макро- и микроводорослями, бактериями и грибами. Одной из причин такой аккумуляции ионов металлов является, с одной стороны, необходимость их участия в важнейших биохимических превращениях, катализируемых ферментами (металлопротеинами), а с другой – низкое содержание многих ионов в морской воде. Концентрации переходных металлов в окружающей среде для морских и наземных организмов отличаются очень значительно. Например, содержание железа в почве и морской воде драматически различается. Многие металлы, в первую очередь железо, ванадий и молиб-

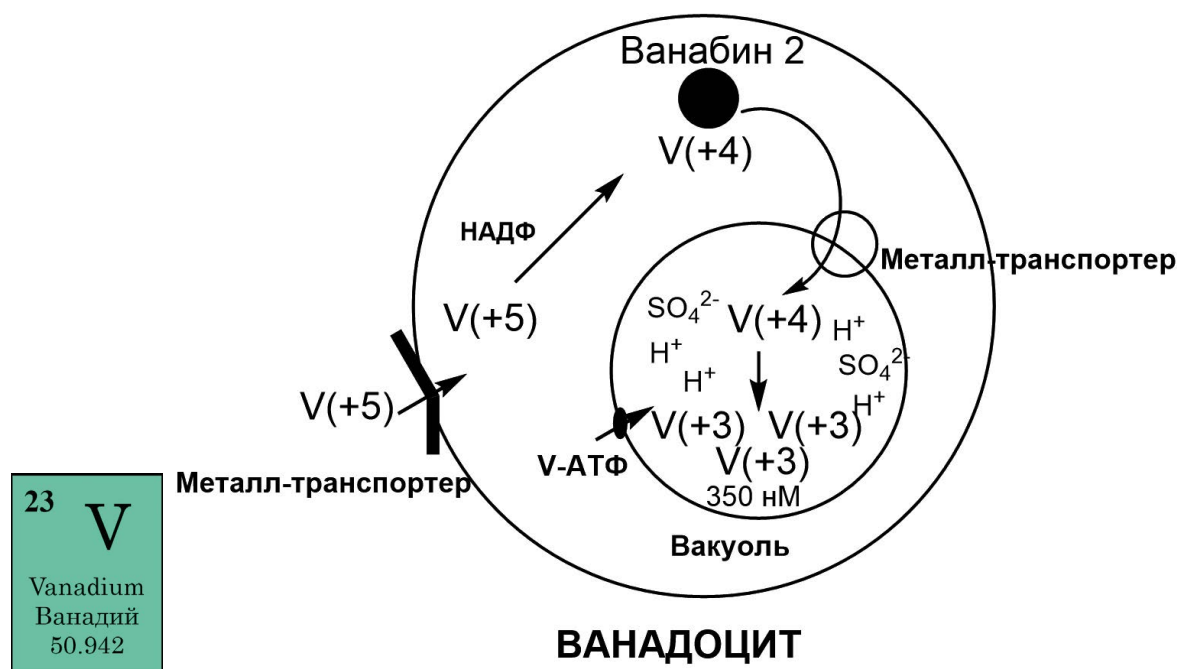


Рис. 1. Схема аккумуляции и восстановления ионов ванадия в ванадоцитах асцидий.

ден, играют важную роль в продуктивности морских сообществ.

К металлопротеинам принадлежат не менее 1/3 всех белков, в том числе ключевые ферменты фотосинтеза, дыхания и азотфиксации, а также различные протеазы и ангидазы. В таких ферментах имеются сайты связывания металлов, а многие их коферменты также способны присоединять ионы металлов. Ряд ферментов морских организмов не имеет гомологии с соответствующими биокатализаторами из наземных организмов. Они могут содержать другие необходимые для их каталитической активности ионы. Например, ангидазы из диатомовых микроводорослей имеют в активном сайте кобальт или кадмий вместо цинка, а ванадийзависимые ферменты катализируют в морских организмах реакцию окислительного галогенирования, которая в наземных организмах катализируется содержащими Fe(III) гемовыми ферментами [7, 8].

Гемоцианины – голубые дыхательные пигменты морских беспозвоночных (моллюсков, членистоногих и мечехвостов), способные присоединять кислород подобно гемоглобину, содержат в своих активных центрах ионы меди, связанные

с белком. Эти кислород-транспортирующие белки имеют экстремально высокие молекулярные массы (до 9 млн Да) и много сайтов связывания кислорода с двумя ионами меди в каждом из них. Ионы меди связаны координационными связями с гистидиновыми остатками белков, а при присоединении кислорода (в виде пероксид-иона) к гемоцианину ионы Cu(I) окисляются до Cu(II), и бесцветный деоксигенированный белок приобретает голубую окраску. Само название «гемоцианин» происходит не от слова «гем», так как гемоцианины не содержат гемовой простетической группы, а от греческого «гемоциано» - голубая кровь. Гемоцианины осьминогов – это комплексы из 10 белков, которые связаны друг с другом ионами магния. В отсутствие ионов магния эти декамеры диссоциируют и дают белковые молекулы с семью кислород-связывающими участками, обозначаемыми латинскими буквами как *Oda-Odg*, от «*Octopus dioxygen*» сайты *a-g* (*Octopus* – родовое название осьминогов) (рис. 2). В результате протеолиза субъединица *Odg*, расположенная на С-конце белковой молекулы, была отделена от других частей молекулы белка и очищена иммуноаффинной хроматографией. Особенности ее строения были изучены с помощью рентгеноструктурного анализа. Она имеет молекулярную массу 47 кДа, состоит из двух доменов, причем один из них, построенный из  $\alpha$ -спиралей, напоминает своей топологией некоторые белки вирусов. Шесть гистидиновых остатков в этом домене связывают ионы меди [9].

Интересно, что голубая кровь некоторых других морских беспозвоночных, например глубоководных голотурий, содержит не медь, а ванадий.

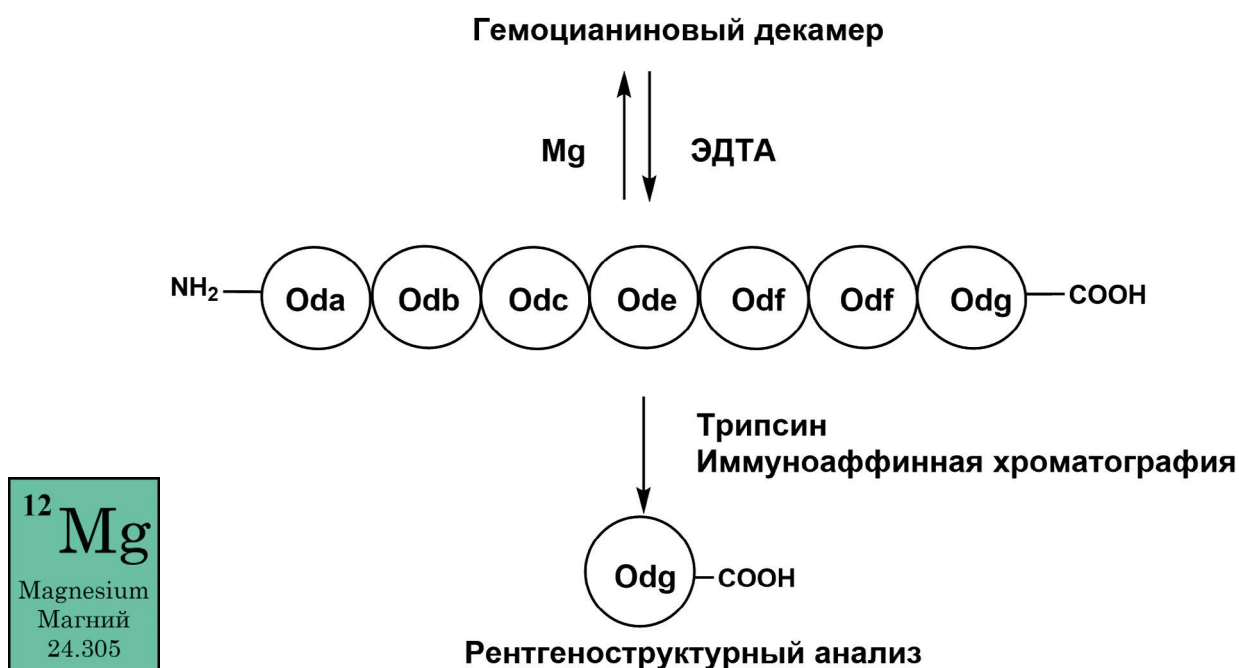


Рис. 2. Схема структурного изучения гемоцианина осьминога.

**Низкомолекулярные морские метаболиты, способные связывать металлы**

Недостаток в морской среде необходимого живым организмам железа хорошо известен. Ионы Fe<sup>3+</sup> в нейтральных водных растворах, в том числе в биологических жидкостях, вследствие плохой растворимости их солей присутствуют в очень низких концентрациях (10<sup>-18</sup> М), в то время как для роста бактерий и других микроорганизмов необходимы микромолярные концентрации Fe<sup>3+</sup>. Недостаток железа является, например, лимитирующим фактором для развития микроводорослей. Природные комплексоны железа в основном пептидной природы, так называемые сидерофоры, часто обнаруживают в бактериях. Например, морские бактерии *Alteromonas luteoviolaceae*, обитающие в олиготрофных и прибрежных морских водах, продуцируют сидерофоры алтеробактины А и В (1, 2) [10, 11], содержащие характерные для сидерофоров некоторых наземных бактерий сайты связывания иона Fe<sup>3+</sup>, такие как фрагменты оксикислот или ароматические ядра с двумя или тремя гидроксильными группами. Бактерии как в морской, так и в наземной среде, чтобы выжить, синтезируют различные метаболиты, присоединяющие железо, причем сидерофоры бактерий более эффективно связывают ионы Fe<sup>3+</sup>, чем сидерофоры грибов. Образующиеся комплексы взаимодействуют с рецепторами микроорганизмов и попадают внутрь их клеток, освобождая необходимое железо. Макроорганизмы – как растения, так и животные – обычно могут расти в присутствии меньших концентраций железа. К тому же они получают необходимые им ионы Fe<sup>3+</sup> от симбионтных бактерий.

В ряде случаев непептидные комплексоны, связывающие ионы Fe(III) или Fe(II), также были выделены из морских беспозвоночных. Несмотря на то, что такие комплексы очень лабильны и легко разлагаются при выделении в условиях молекулярной или обращеннофазовой хроматографии, в липофильных экстрактах асидии *Eudistoma gilboviride* с помощью гель-фильтрации с последующей масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой был обнаружен комплекс трех молекул эудистомина и Fe(II) [12] (рис. 3).

Комплексные соединения с другими ионами металлов в ряде случаев удалось выделить или идентифицировать в некоторых других морских беспозвоночных и микроорганизмах. Среди комплексонов, содержащихся в организмах беспозвоночных, много макроциклических и гетероциклических соединений (рис. 4). Так, тетрапиррольный никельсодержащий сине-зеленый пигмент тунихлорин был найден в асидии *Trididemnum solidum* [13]. Макроциклический поликетид геодин А из австралийской губки рода *Geodia*, собранной на Большом Барьерном Рифе, представляет собой магниевую соль и обладает сильным нематоцидным действием [14]. Цин-

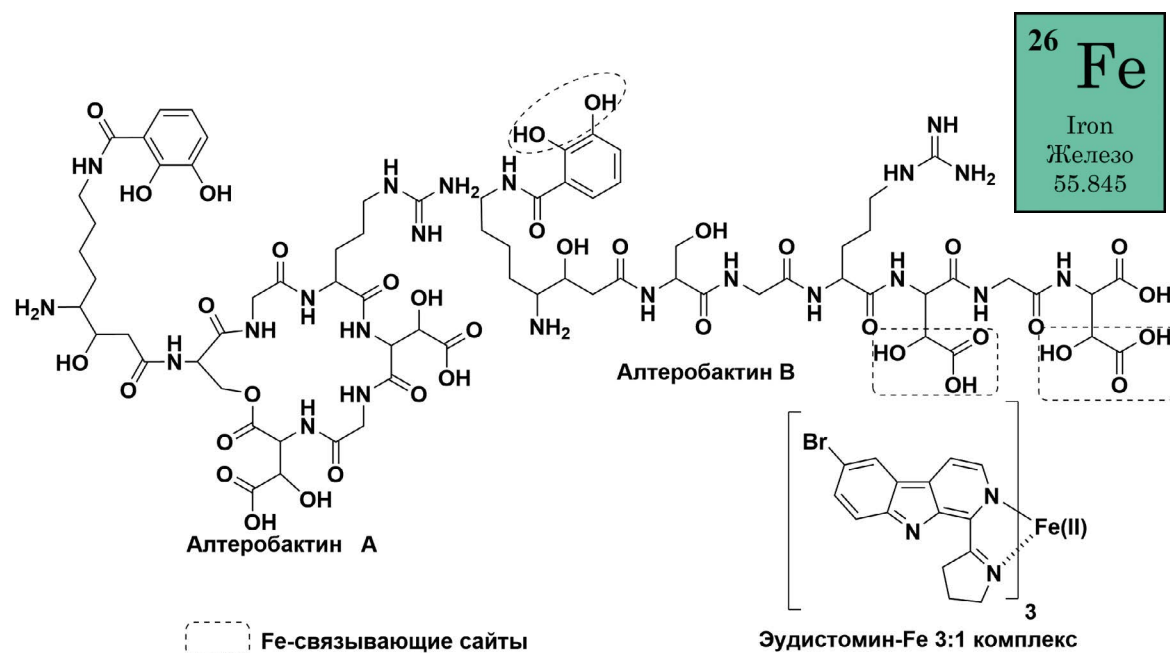


Рис. 3. Связывающие железо морские вторичные метаболиты.

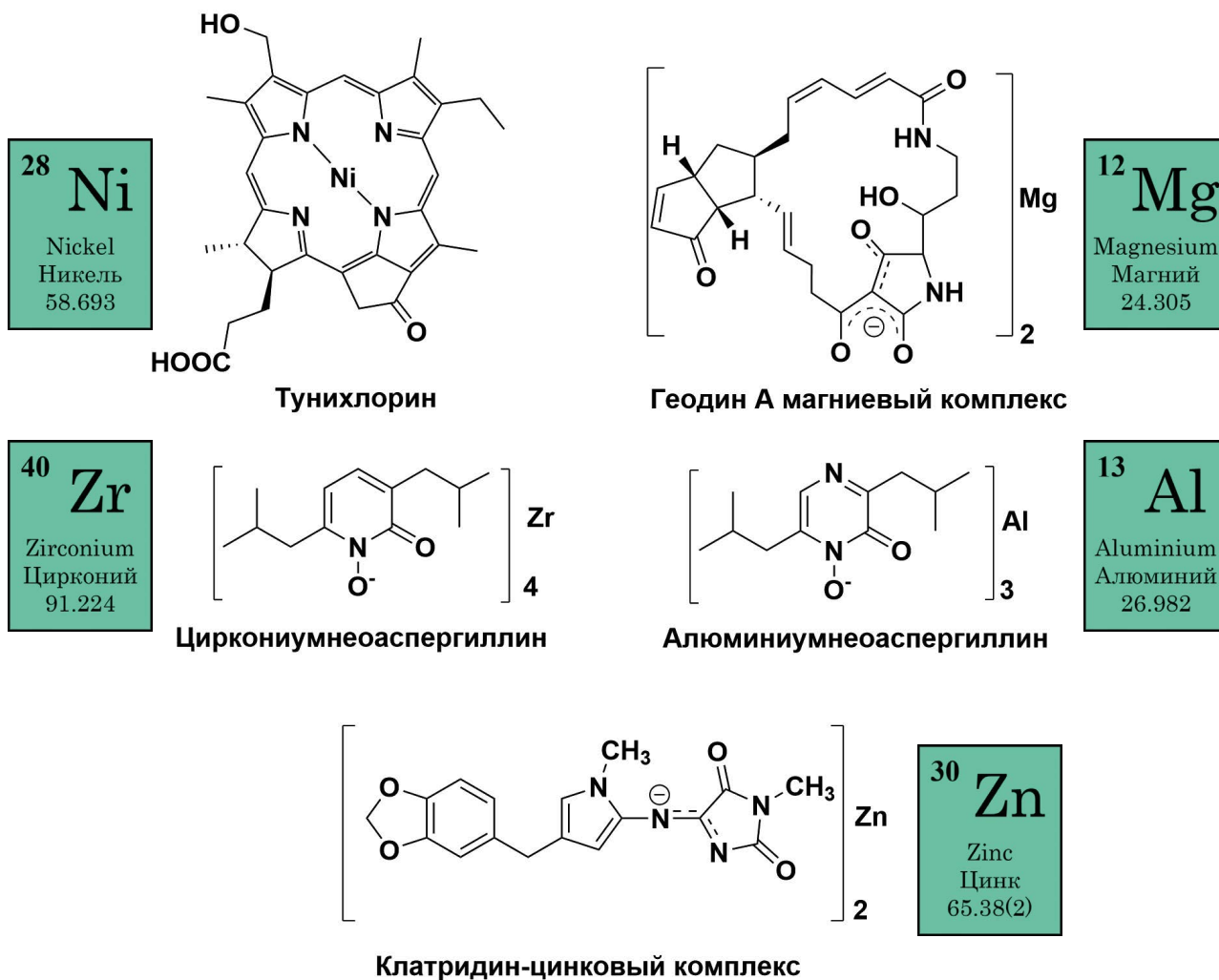


Рис. 4. Некоторые комплексы металлов, выделенные из морских организмов.

ковые комплексы были выделены из экстрактов кальциевых губок, например клатридин-цинковый комплекс из средиземноморской губки *Clathrina clatrata* [15]. Морской гриб, выделенный из горгониевого коралла *Melitodes squamata* и идентифицированный как *Aspergillus* sp., содержал несколько новых микотоксинов, в том числе представляющих собой алюминиевую и циркониювую соли производных аспергилловой кислоты [16] (рис. 4).

Тем не менее, выделение таких соединений из-за их низкой стабильности все еще остается редким, хотя известно очень много метаболитов, имеющих структурные особенности, которые показывают, что они могли бы такие комплексы или соли создавать. Среди них – потенциальные ионофоры – макроциклические сое-

динения, включая циклические пептиды, различные гетероциклические кислоты, спирты, тиолы и т. д. Поэтому на протяжении многих последних лет предпринимают попытки изучить комплексообразование таких морских метаболитов с различными солями *in vitro*, чтобы установить молекулярные механизмы накопления тех или иных элементов продуцентами этих метаболитов (беспозвоночными, водорослями, микроорганизмами). Классическим примером таких исследований было изучение необычного пептида – каледонина из новокаледонской асцидии *Didemnum rodriguesi* [17]. Чтобы подтвердить гипотезу, что это соединение может участвовать в накоплении асцидией цинка и меди, было выполнено титрование раствора каледонина хлористым цинком и изучены происходящие при этом изменения ЯМР-спектров. В результате было доказано, что каледонин образует комплекс с ионами цинка в соотношении: две молекулы каледонина на один ион  $Zn^{2+}$ . Подобные эксперименты показали, что джасплакинолид из морских губок *Jaspis johnstoni* способен связывать ионы лития [18], а уэстиелламид из сине-зеленых водорослей

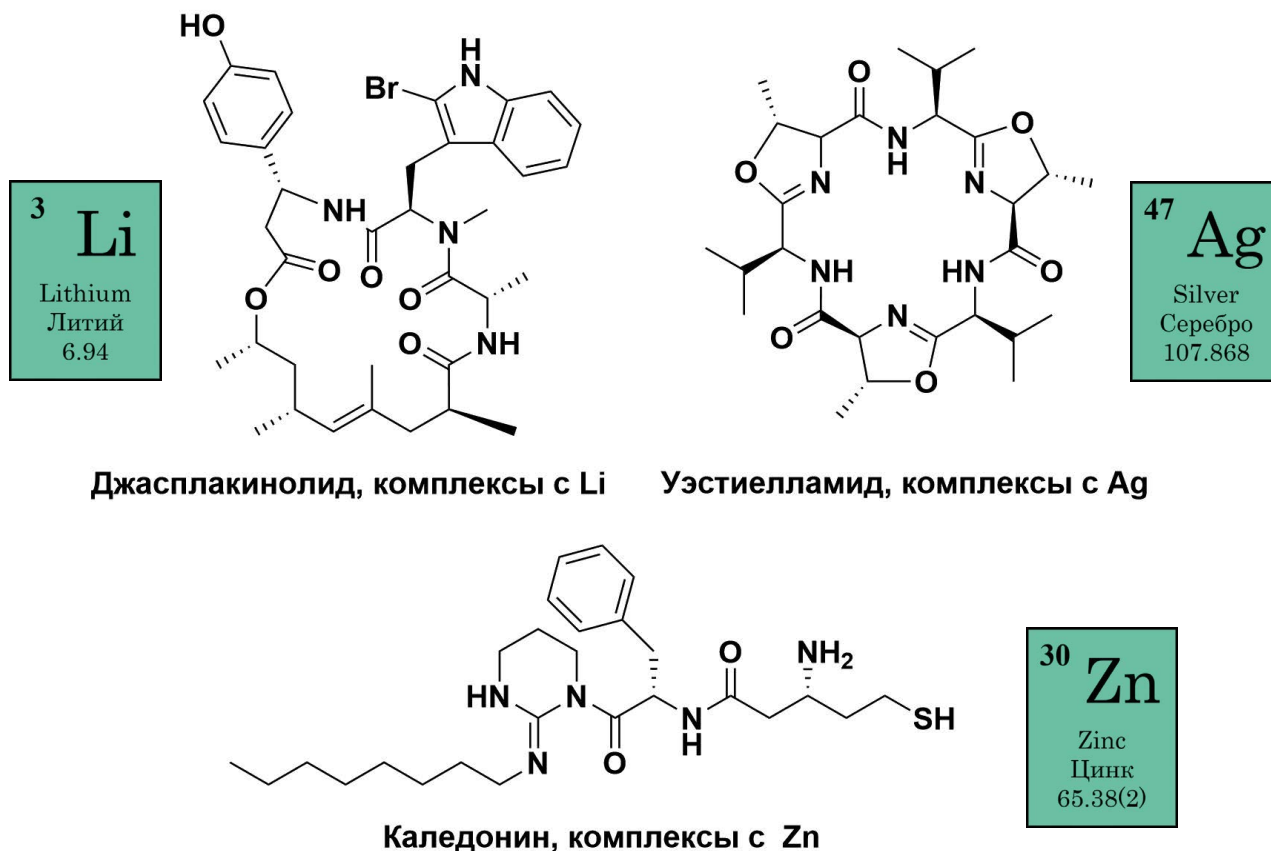


Рис. 5. Некоторые морские метаболиты, для которых способность образовывать комплексы с металлами показана экспериментально.

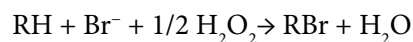
*Westiellopsis prolifica* – ионы серебра [19] (рис. 5). Аналогично были установлена способность других морских метаболитов связывать различные металлы, включая медь, железо, цинк, рутений и др. При этом использовали различные варианты физико-химических методов, включая масс-спектрометрию [2].

**Морские природные соединения, содержащие галогены и серу**

Очень широко представлены в морских бактериях, растениях и животных галогенированные метаболиты. В биохимических процессах в морских организмах часто принимают участие неорганические компоненты морской среды. Как известно, морская вода содержит в растворенном виде гигантское количество различных солей, а, следовательно, катионов металлов и анионов, в том числе 19 000 мг/л Cl<sup>-</sup>, 65 мг/л Br<sup>-</sup>, 0.06 мг/л I<sup>-</sup> и IO<sub>3</sub><sup>-</sup>, много сульфат- и нитрат-анионов. В морских вторичных метаболитах найдены все галогены, включая редкий в природных соединениях фтор. Например, из губки *Phakellia fusca* был выделен ранее синтезированный и применяемый в онкологии фторурацил и его производные [20] (рис. 6).

Интересно, что чаще в морских природных соединениях находят не атомы наиболее распространенного в морской среде галогена – хлора, а менее

распространенного брома. Последнее, очевидно, связано с биологическими свойствами бромированных метаболитов. Бромированные метаболиты (богатými источниками таких соединений являются красные водоросли, питающиеся ими моллюски и губки) часто проявляют детергентное действие и отпугивают хищников. Реакцию бромирования катализируют ванадийсодержащие ферменты бромпероксидазы; она протекает согласно уравнению:



Эти ферменты широко распространены в водорослях, до 70% видов которых проявляют бромпероксидазную активность, что объясняет высокое содержание в них различных бромированных соединений, включая терпеноиды, алкалоиды, полифенолы и другие метаболиты. Бромирование играет роль и в окраске водорослей. Бромпероксидазы найдены также в брюхоногих мол-

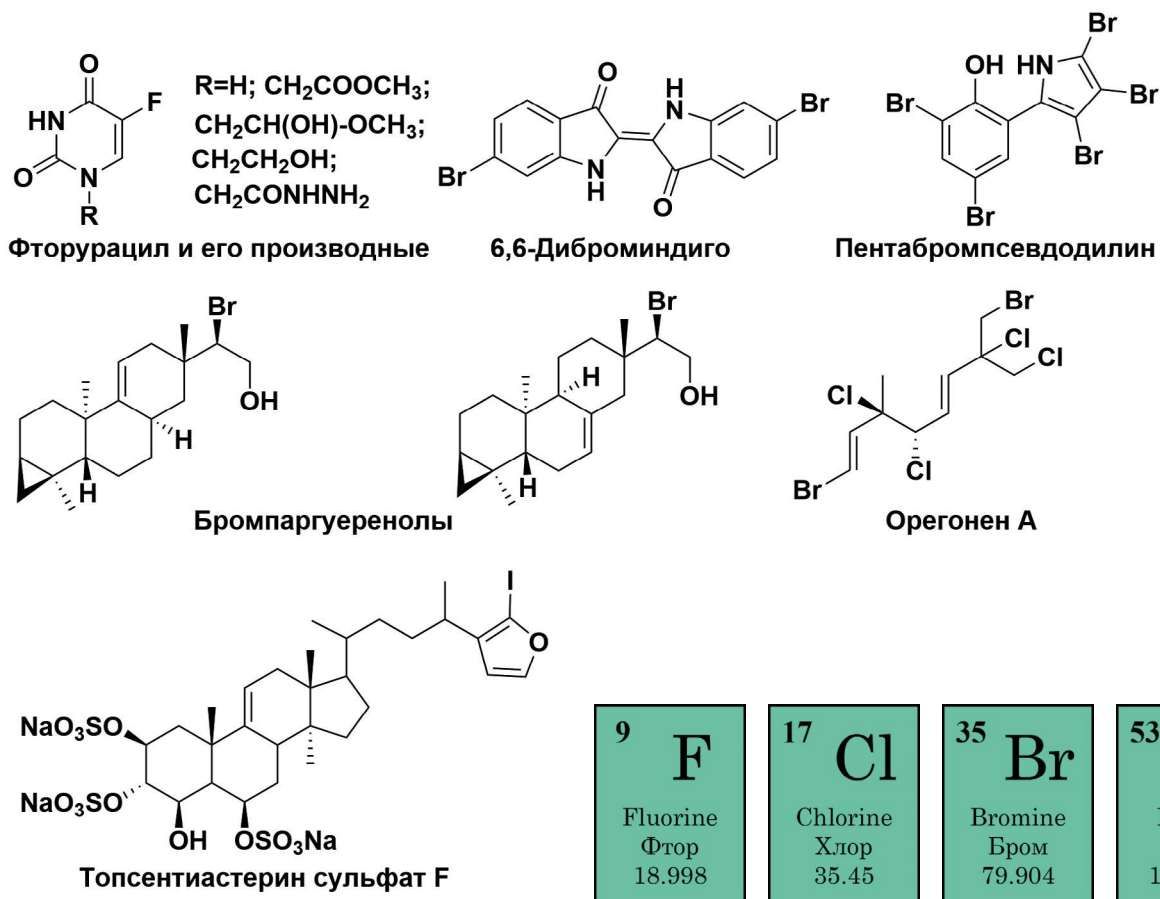


Рис. 6. Примеры галогенированных морских метаболитов.

люсках рода *Murex*, которые биосинтезируют пигмент пурпур, применявшийся в древности для окраски королевских мантий. Его основным компонентом является 6,6'-диброминдиго. Некоторые морские бактерии содержат значительные количества галогенированных метаболитов, например пентабромпсевдоиндиго, проявляющего сильное противомикробное действие, в том числе против метициллин-устойчивых штаммов патогенных бактерий [21]. В красных водорослях рода *Laurencia* разнообразие галогенированных метаболитов особенно высоко. Например, из дальневосточной *Laurencia nipponica* выделены необычные дитерпеноиды – бромированные производные паргуерена [22].

В некоторых морских природных соединениях присутствует несколько галогеновых атомов, а общее содержание галогенов может достигать 80% от молекулярной массы этих

метаболитов. Так, орегонен А из красной водоросли *Placomium oregonum* содержит шесть атомов галогенов (четыре – хлора и два – брома) [23].

Йодированные соединения находят редко, в особенности это касается таких групп метаболитов, как стероиды. В то же время в найденном нами топсентиастерин сульфате F из губки *Toposentia sp.* присутствует йод вместе с тремя сульфатными группами [24].

Серосодержащие метаболиты также широко распространены в организмах морских беспозвоночных, причем они могут содержать либо сульфатные группы, либо полисульфидные фрагменты, имеющие от трех до пяти атомов серы. Варацин с пентасульфидным фрагментом в одном из циклов обладает сильным противомикробным действием, а близкий к нему по структуре трисульфид варацин С, также выделенный из асцидии *Polycitor sp.*, высокотоксичен в отношении опухолевых клеток [25]. В тритерпеновых гликозидах из голотурий часто встречаются соединения, содержащие три сульфатные группы, например кореозид С из *Cicumaria koraiensis* [26]. Сульфатированные стероидные и тритерпеновые гликозиды особенно характерны для иглокожих. Например, в морских звездах почти всегда присутствуют токсичные для хищных рыб стероидные глико-

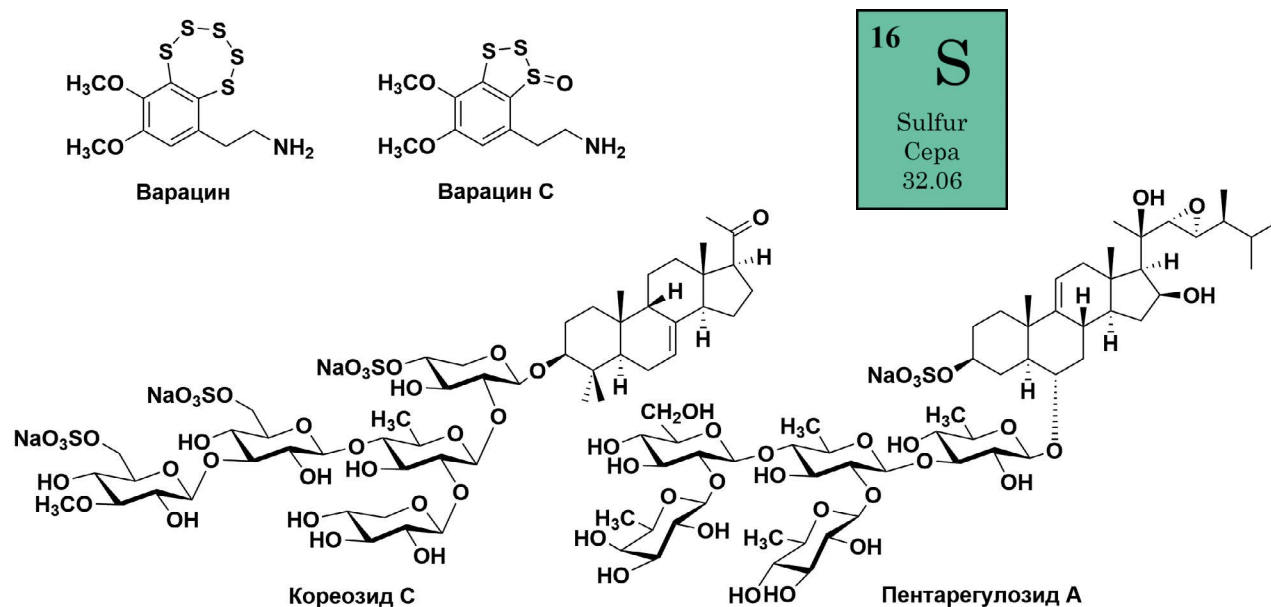


Рис. 7. Примеры серосодержащих морских метаболитов.

зиды астеросапонины, подобные найденному нами в морской звезде *Pentacaster regulus* пентарегулозиду А (рис. 7) [27]. В водорослях имеются значительные количества различных сульфатированных полисахаридов.

**Селеносодержащие морские метаболиты**

Селен – необходимый для человеческого организма элемент. Его пищевыми источниками являются мясо, яйца и другие продукты и, не в последнюю очередь, рыба и другие разновидности так называемой морской пищи (seafood) [28]. Селен в составе селеноцистеиновых аминокислотных остатков включен в ряд важных ферментов, например глутатион пероксидазы и тиоредоксин редуктазы. Антиоксидантная активность селена играет важную протективную роль, защищая человека от почти 50 болезней, в том числе рака прямой кишки, иммунодефицитов, сер-

дечно-сосудистых заболеваний, связанных с недостатком селена.

Новый Se-содержащий метаболит, селенонеин, был выделен в качестве главной формы органического селена из мяса и крови тунца. Он содержит атом селена, связанный с имидазольным циклом. Это соединение обладает сильной антиоксидантной активностью и, присоединяясь к гемовым белкам гемоглобину и миоглобину, предохраняет их от окисления, уменьшает образование свободных радикалов, замедляет хронические болезни и старение [28]. Структура, трансформации и роль селенонеина показаны на рис. 8.

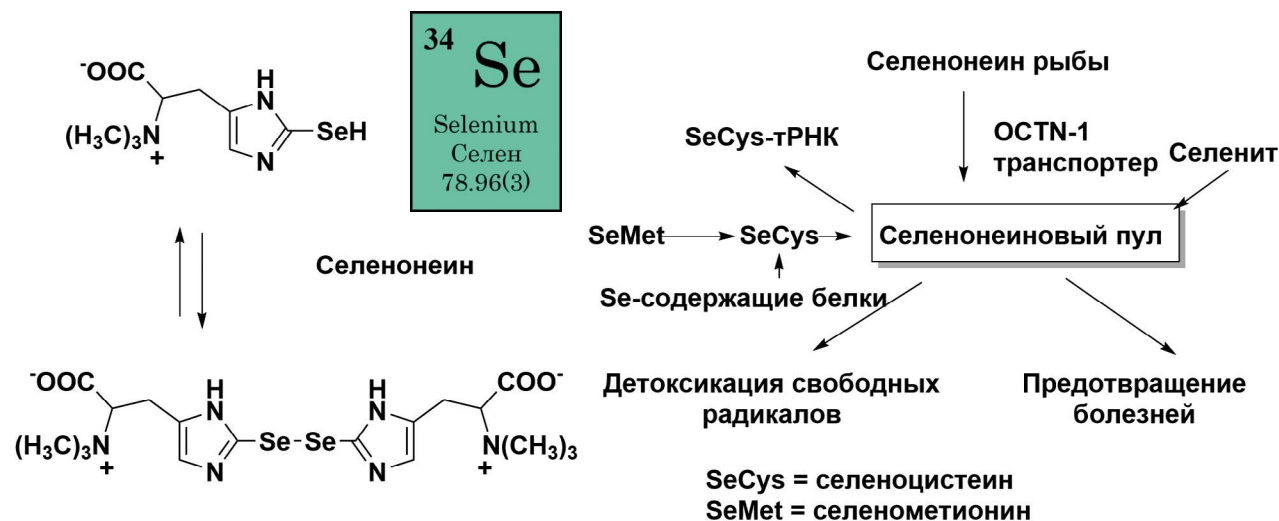


Рис. 8. Селенонеин, его трансформации и биологические роли.



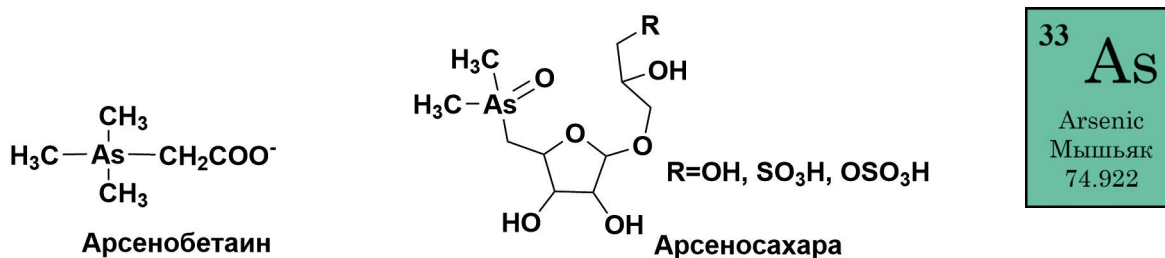


Рис. 9. Мышьяксодержащие морские метаболиты.

### Мышьяксодержащие метаболиты

Содержание мышьяка в морской воде составляет 0.003 мг/л, и хорошо известно, что он накапливается в фитопланктоне, а через пищевые цепи попадает во многие морские организмы, в том числе съедобные для человека. Один из самых распространенных морских метаболитов, содержащих мышьяк, – арсенобетаин – был найден сначала в лобстере, а его строение было установлено рентгеноструктурным анализом. В отличие от других производных мышьяка, он оказался малотоксичным. Мышьяк был найден также в липидных фракциях, в основном из водорослей. Так называемые арсеносахара (рис. 9) сначала были обнаружены в бурой водоросли *Ecklonia radiata*, а потом и в ряде других морских организмов [29]. Сообщалось также, что в ДНК бактериального штамма GFAJ-1 вместо фосфора имеются атомы мышьяка, но дальнейшие исследования не

подтвердили это наблюдение. Считается, что очень небольшие дозы природных соединений могут проявлять благоприятное для организма действие, а сам мышьяк можно отнести к ультрамикрорезультатам.

### Заключение

Почти половина из всех стабильных (нерадиоактивных) элементов таблицы Менделеева способны связываться с теми или иными морскими природными соединениями. Разнообразие таких комплексных соединений по сравнению с веществами наземного биогенного происхождения, как и разнообразие других морских метаболитов, очевидно, связано с тем, что в морской среде обитает значительно больше представителей крупных таксонов (типов) животных, растений и микроорганизмов по сравнению с сушей, то есть с таксономическим разнообразием морских организмов. История изучения морских природных соединений существенно короче, чем наземных, в особенности растительных метаболитов. Поэтому не вызывает сомнений, что в морских организмах еще будут найдены новые многочисленные природные комплексоны и элементоорганические соединения с неожиданными и полезными свойствами.

## Литература

- W. Kaim, B. Schwederski *Bioinorganic Chemistry – Inorganic Elements in the Chemistry of Life: An Introduction and Guide, (Inorganic Chemistry: A Textbook Series)*, UK, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 1994, 401 pp.
- S.H. Wright, A. Raab, J. Feldmann, E. Krupp, M. Jaspars *B Handbook of Marine Natural Products*, Eds E. Fattorusso, W.Y. Gerwick, O. Tagliatalata-Scafati, Springer science + Business Media B.V., 2012, pp. 861–892. DOI: 10.1007/978-90-481-3834-0\_16.
- M.J. Smith, D. Kim, B. Horenstein, K. Nakanishi, K. Kustin *Acc. Chem. Res.*, 1991, **24**(4), 117. DOI: 10.1021/ar00004a005.
- T. Hamada, M. Asanuma, T. Ueki, F. Hayashi, N. Kobayashi, Sh. Yokoyama, H. Michibata, H. Hirota *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**(12), 4216. DOI: 10.1021/ja042687j.
- M. Smith *Experientia*, 1989, **45**(5), 452. DOI: 10.1007/BF01952027.
- D.K. Stoecker *Mar. Ecol. Progress Ser.*, 1980, **3**(3), 257. DOI: 10.3354/meps003257.
- J.G. Lee, S.B. Roberts, F.M.M. Morel *Limnol. Oceanogr.*, 1995, **40**(6), 1056. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1056.
- A. Butler *Curr. Opinion in Chem. Biol.: Bioinorg. Chem.*, 1998, **2**(2), 279. DOI: 10.1016/S1367-5931(98)80070-7.
- M. Cuff, K.I. Miller, K.E. van Holde, W.A. Hendrickson *J. Mol. Biol.*, 1998, **278**(4), 855. DOI: 10.1006/jmbi.1998.1647.
- A. Butler *Science*, 1998, **281**(5374), 207. DOI: 10.1126/science.281.5374.207.
- R.T. Reid, D.H. Live, D.J. Faulkner, A. Butler *Nature*, 1993, **366**(6454), 455. DOI: 10.1038/366455a0.
- S.H. Wright, A. Raab, J.N. Tabudravu, J. Feldmann, P.F. Long, C.N. Battershill, W.C. Dunlap, B.F. Milne, M. Jaspars *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, **47**(42), 8090. DOI: 10.1002/anie.200802060.
- K.L. Rinehart, V. Kishore, K.C. Bible, R. Sakai, D.W. Sullins, K.-M. Li *J. Nat. Prod.*, 1988, **51**(1), 1. DOI: 10.1021/np50055a001.
- R.J. Capon, C. Skene, E. Lacey, J.H. Gill, D. Wadsworth, T. Friedel *J. Nat. Prod.*, 1999, **62**(9), 1256. DOI: 10.1021/np990144v.
- P. Ciminiello, E. Fattorusso, A. Mangoni, B. Di Blasio, V. Pavone *Tetrahedron*, 1990, **46**(12), 4387. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)86773-9.
- X. Xu, F. He, X. Zhang, J. Bao, Sh. Qi *Food Chem. Toxicol.*, 2013, **53**, 46. DOI: org/10.1016/j.fct.2012.11.037.
- M.J. Vázquez, E. Quiñoá, R. Riguera, A. Ocampo, T. Iglesias, C. Debitus *Tetrahedron Lett.*, 1995, **36**(48), 8853. DOI: 10.1016/0040-4039(95)01837-8.

18. W. Inman, P. Crews, R. McDowell  
*J. Org. Chem.*, 1989, 54(11), 2523. DOI: 10.1021/jo00272a010.
19. P. Wipf, S. Venkatraman, C.P. Miller, S.J. Geib  
*Angew. Chem. Int. Ed.*, 1994, 33(14), 1516.  
DOI: 10.1002/anie.199415161.
20. X.-H. Xu, G.-M. Yao, Y.-M. Li, J.-H. Lu, C.-J. Lin, X. Wang, C.-H. Kong  
*J. Nat. Prod.*, 2003, 66(2), 285. DOI: 10.1021/np020034f.
21. P.R. Burkholder, R.M. Pfister, F.H. Leitz  
*Appl. Microbiol.*, 1966, 14(4), 649.
22. E.G. Lyakhova, A.I. Kalinovskiy, S.A. Kolesnikova, V.E. Vaskovskiy, V.A. Stonik  
*Phytochemistry*, 2004, 65(18), 2527.  
DOI: 10.1016/j.phytochem.2004.07.005.
23. P. Crews  
*J. Org. Chem.*, 1977, 42(15), 2634. DOI: 10.1021/jo00435a024.
24. A.G. Guzii, T.N. Makarieva, V.A. Denisenko, P.S. Dmitrenok, Y.V. Burtseva, V.B. Krasokhin, V.A. Stonik  
*Tetrahedron Lett.*, 2008, 49(50), 7191. DOI: 10.1016/j.tetlet.2008.10.007.
25. T.N. Makarieva, V.A. Stonik, A.S. Dmitrenok, B.B. Grebnev, V.V. Isakov, N.M. Rebachyk, Y.W. Rashkes  
*J. Nat. Prod.*, 1995, 58(2), 254. DOI: 10.1021/np50116a015.
26. S.A. Avilov, A.I. Kalinovskiy, V.I. Kalinin, V.A. Stonik, R. Riguera, C. Jiménez  
*J. Nat. Prod.*, 1997, 60(8), 808. DOI: 10.1021/np970152g.
27. A.A. Kicha, A.I. Kalinovskiy, N.V. Ivanchina, T.V. Malyarenko, P.S. Dmitrenok, A.S. Kuzmich, E.V. Sokolova, V.A. Stonik  
*J. Nat. Prod.*, 2017, 80(10), 2761. DOI: 10.1021/acs.jnatprod.7b00574.
28. S. Himeno, N. Imura  
*J. Health Sci.*, 2000, 46(6), 393. DOI: 10.1248/jhs.46.393.
29. J.S. Edmonds, K.A. Francesconi  
*Nature*, 1981, 289, 602. DOI: 10.1038/289602a0.

English

## Mendeleev's Periodic Table and Marine Biomolecules

**Valentin A. Stonik**

Professor,

Scientific Advisor of G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS  
159/2, 100-let Vladivostoku Ave., Vladivostok, 690022, Russia  
stonik@piboc.dvo.ru

**Tatyana N. Makarieva**

G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS  
159/2, 100-let Vladivostoku Ave., Vladivostok, 690022, Russia  
makarieva@piboc.dvo.ru

### Abstract

The mini-review highlights the involvement of some elements of Mendeleev Periodic Table into marine biogenic compounds and these elements participation in the marine organisms' metabolism. Some metals accumulation by marine invertebrates and the metal complexation by highly structurally diverse secondary metabolites are discussed. In addition, examples of the covalent bonds formation in marine bioorganic molecules with a number of non-metals are considered.

**Keywords:** marine organisms, marine metabolites, metals, non-metals, complexones, elemento-organic biomolecules.

### Images & Tables

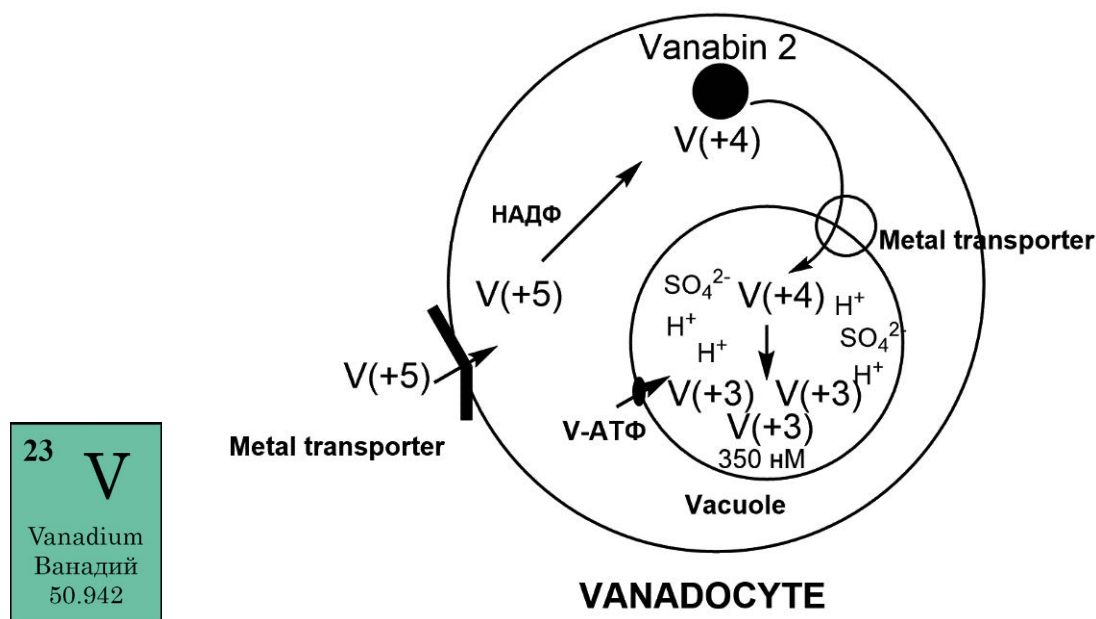


Fig. 1. Scheme of accumulation and reduction of vanadium ions in ascidian vanadocytes.

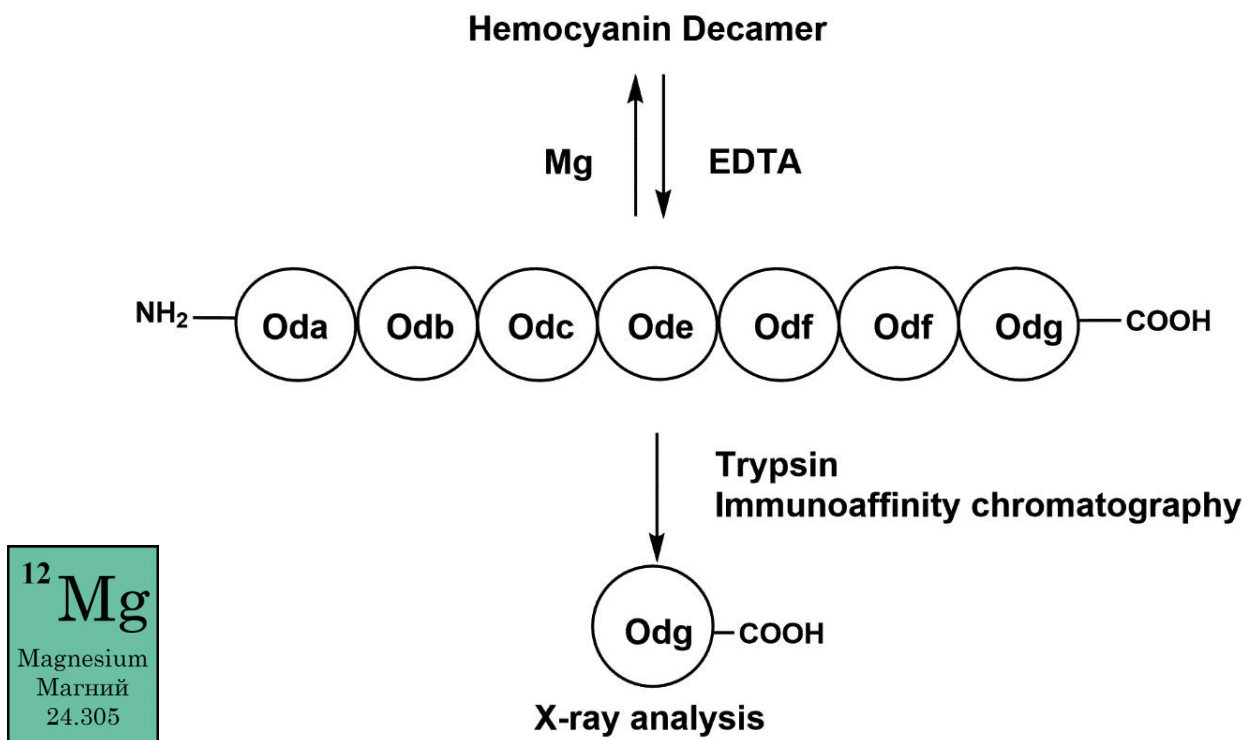


Fig. 2. Scheme of structural study of octopus hemocyanin.

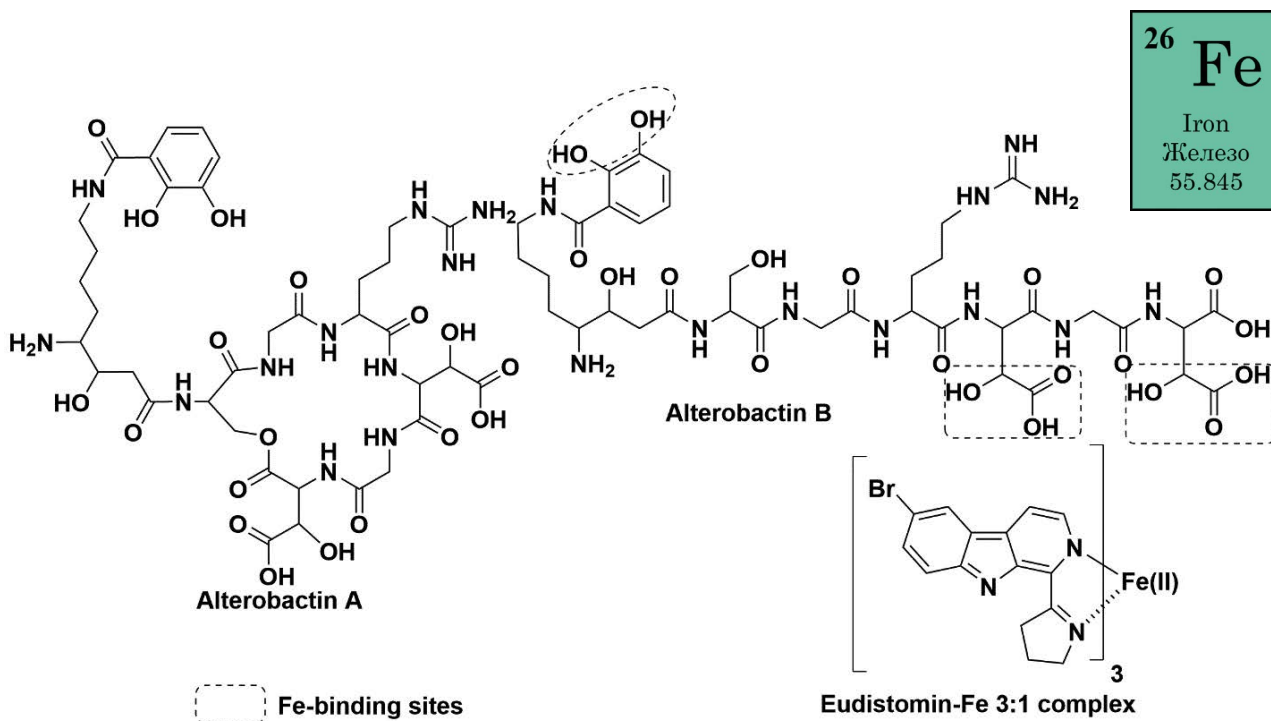


Fig. 3. Iron-binding marine secondary metabolites.

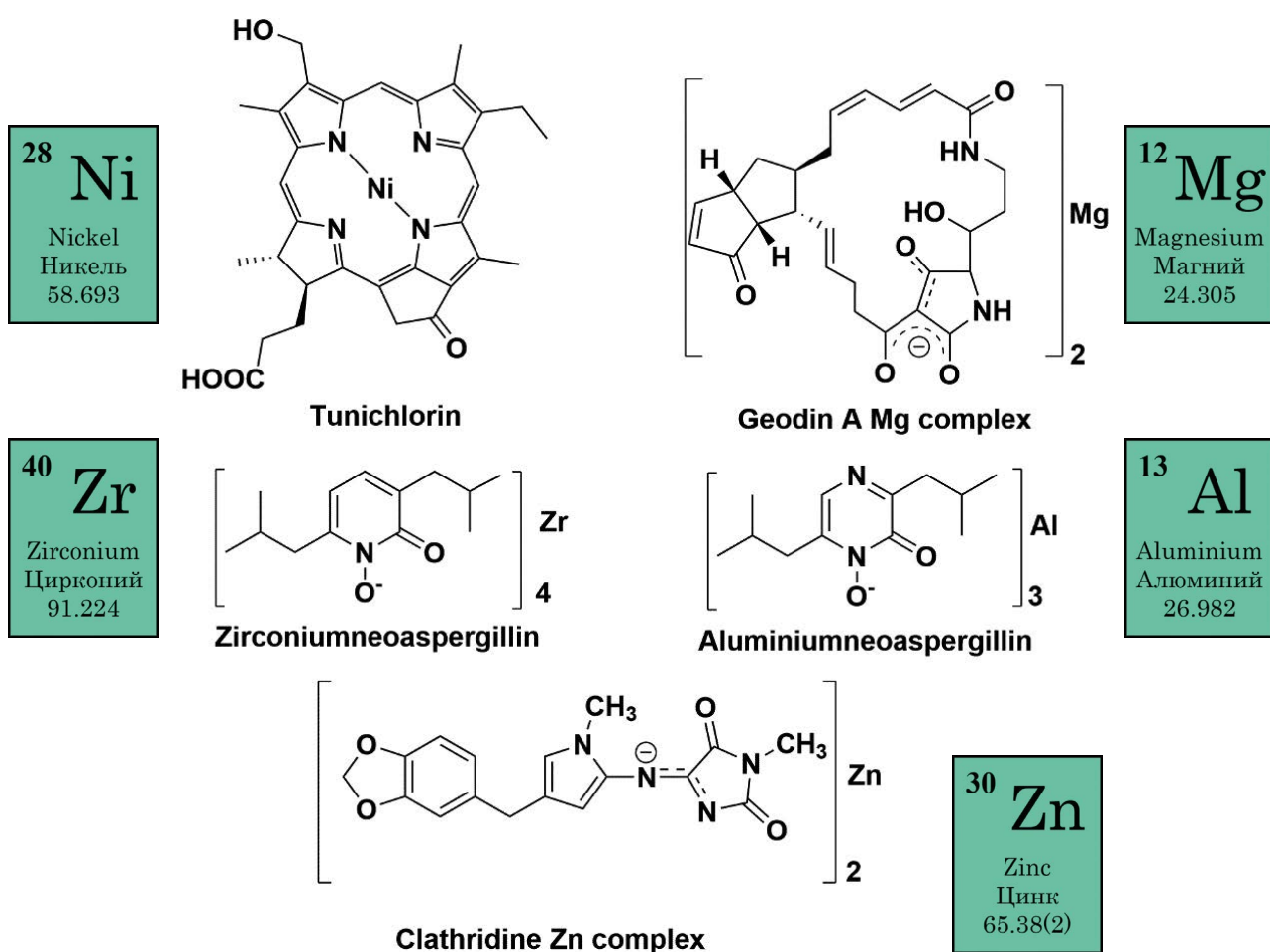


Fig. 4. Some examples of metals complexes isolated from marine organisms.

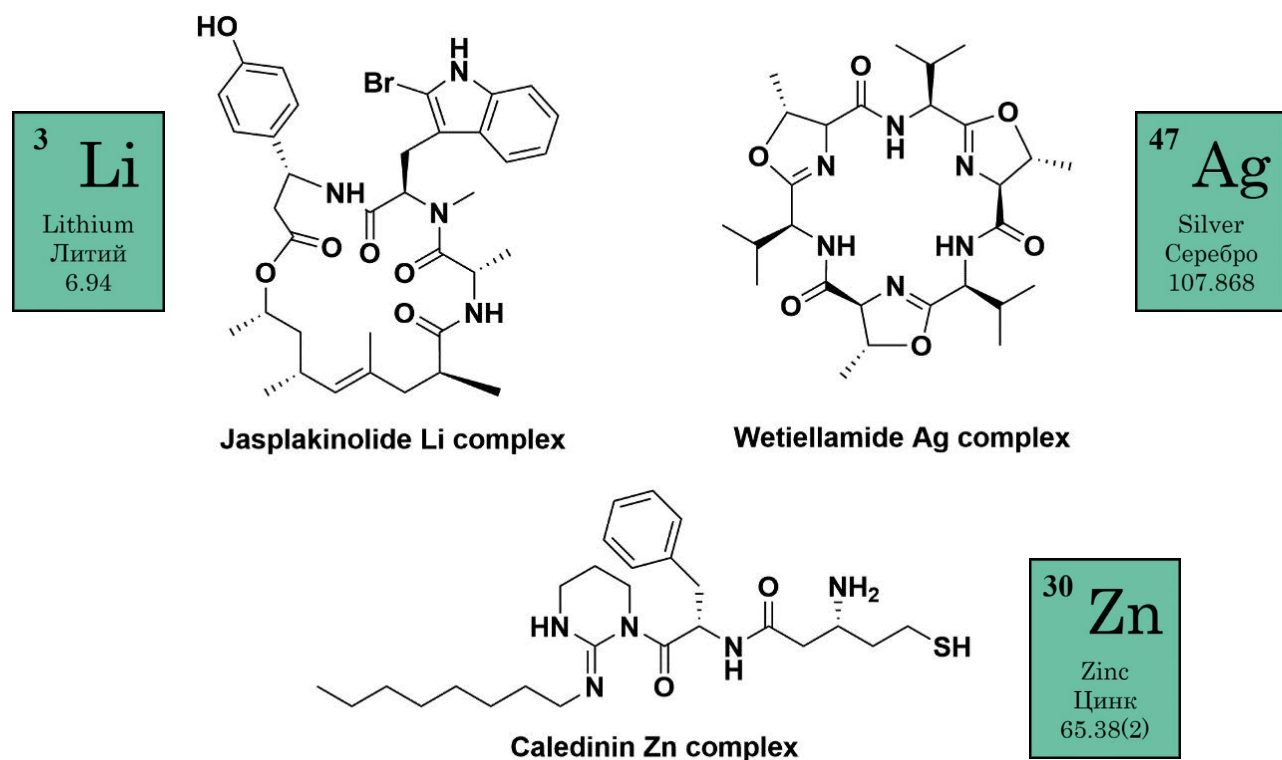


Fig. 5. Some marine metabolites for which the ability to form complexes with metals has been shown experimentally.

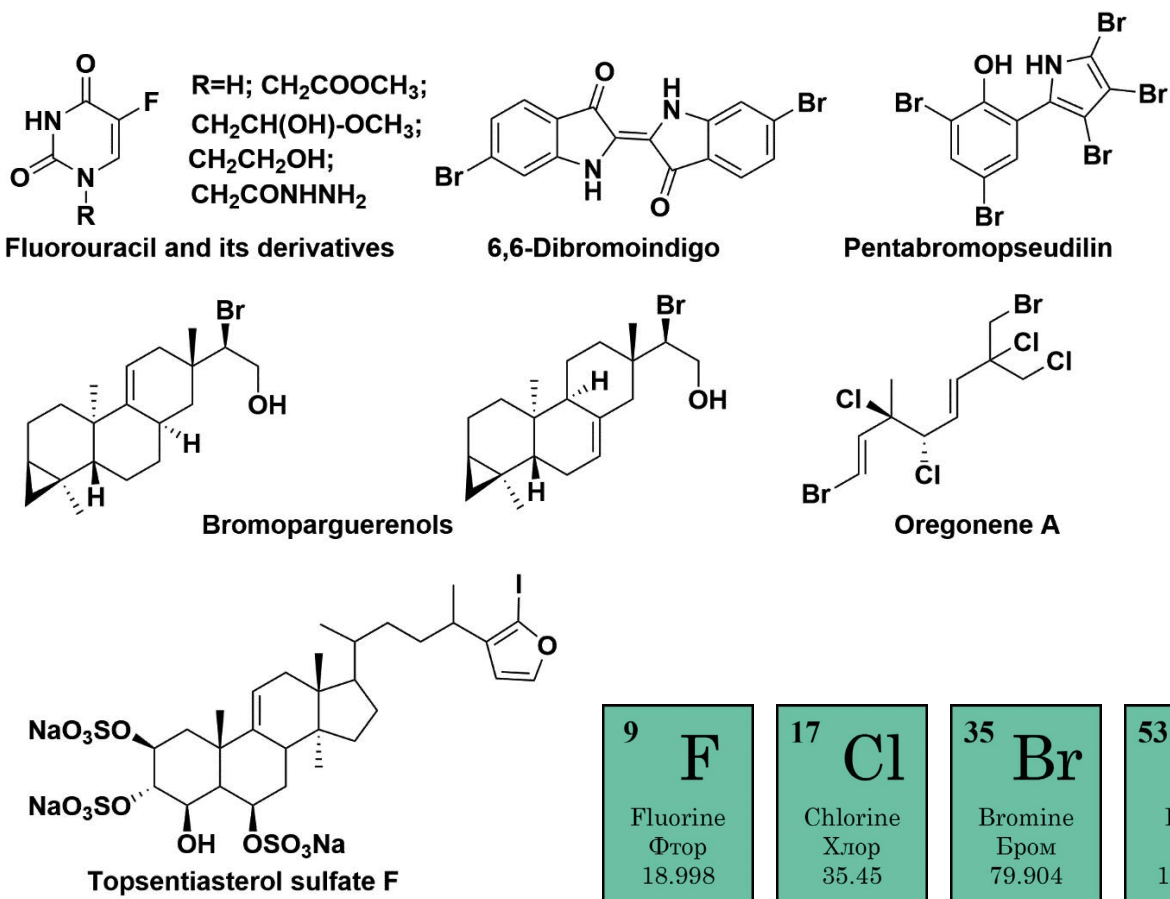


Fig. 6. Some examples of halogenated marine metabolites.

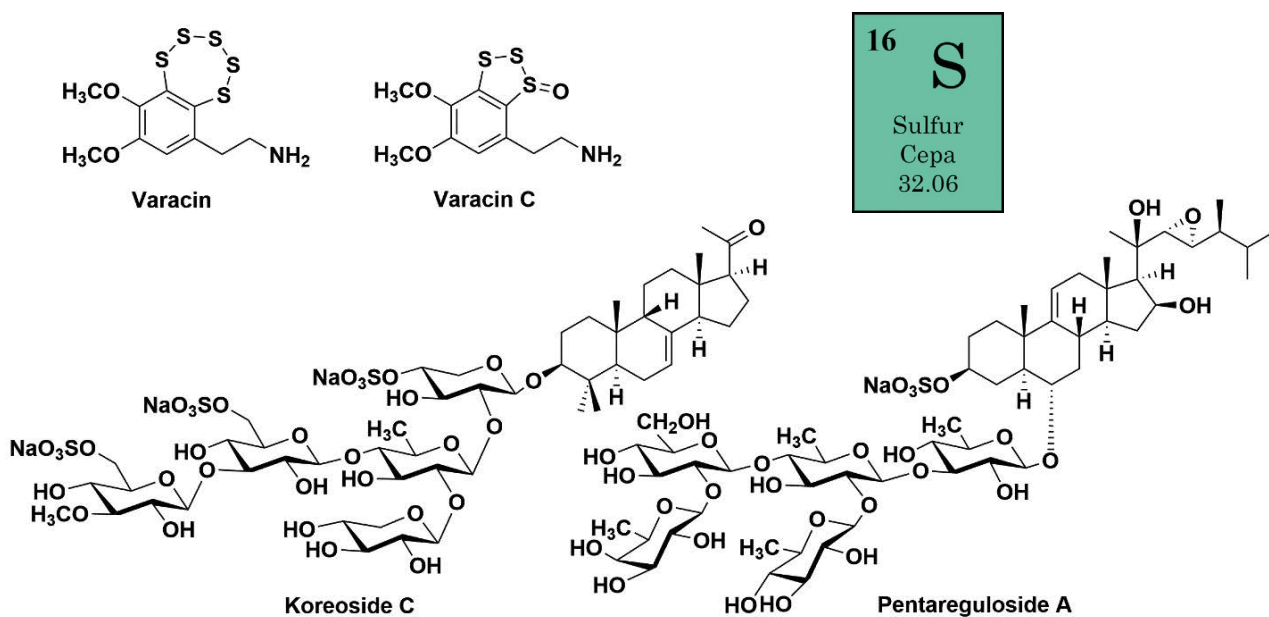


Fig. 7. Some examples of sulfur-containing marine metabolites.

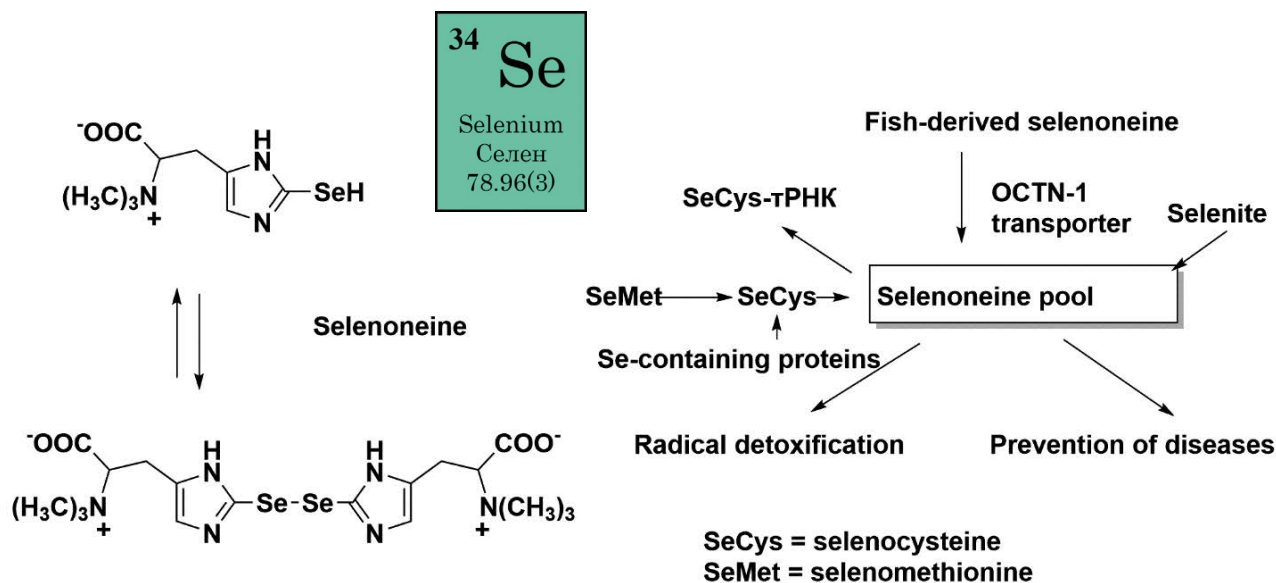


Fig. 8. Selenoneine, its transformations and biological roles.

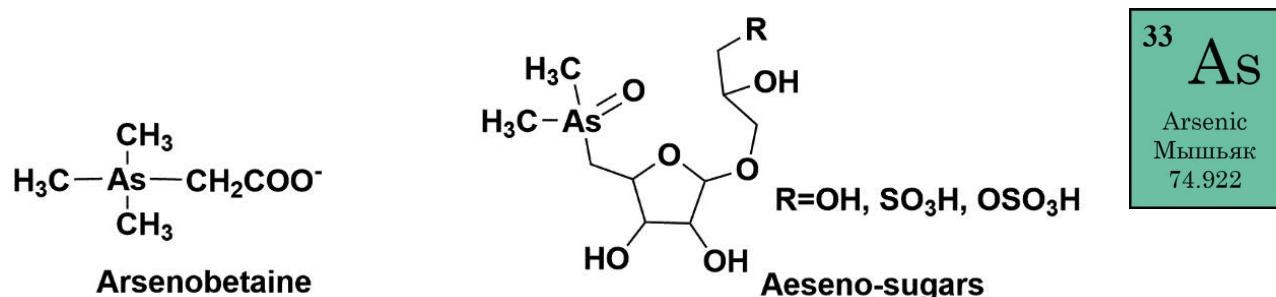


Fig. 9. Arsenic-containing marine metabolites.

## References

- W. Kaim, B. Schwederski *Bioinorganic Chemistry – Inorganic Elements in the Chemistry of Life: An Introduction and Guide, (Inorganic Chemistry: A Textbook Series)*, UK, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 1994, 401 pp.
- S.H. Wright, A. Raab, J. Feldmann, E. Krupp, M. Jaspars *B Handbook of Marine Natural Products*, Eds E. Fattorusso, W.Y. Gerwick, O. Tagliatalata-Scafati, Springer science + Business Media B.V., 2012, pp. 861–892. DOI: 10.1007/978-90-481-3834-0\_16.
- M.J. Smith, D. Kim, B. Horenstein, K. Nakanishi, K. Kustin *Acc. Chem. Res.*, 1991, **24**(4), 117. DOI: 10.1021/ar00004a005.
- T. Hamada, M. Asanuma, T. Ueki, F. Hayashi, N. Kobayashi, Sh. Yokoyama, H. Michibata, H. Hirota *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**(12), 4216. DOI: 10.1021/ja042687j.
- M. Smith *Experientia*, 1989, **45**(5), 452. DOI: 10.1007/BF01952027.
- D.K. Stoecker *Mar. Ecol. Progress Ser.*, 1980, **3**(3), 257. DOI: 10.3354/meps003257.
- J.G. Lee, S.B. Roberts, F.M.M. Morel *Limnol. Oceanogr.*, 1995, **40**(6), 1056. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1056.
- A. Butler *Curr. Opinion in Chem. Biol.: Bioinorg. Chem.*, 1998, **2**(2), 279. DOI: 10.1016/S1367-5931(98)80070-7.
- M. Cuff, K.I. Miller, K.E. van Holde, W.A. Hendrickson *J. Mol. Biol.*, 1998, **278**(4), 855. DOI: 10.1006/jmbi.1998.1647.
- A. Butler *Science*, 1998, **281**(5374), 207. DOI: 10.1126/science.281.5374.207.
- R.T. Reid, D.H. Live, D.J. Faulkner, A. Butler *Nature*, 1993, **366**(6454), 455. DOI: 10.1038/366455a0.
- S.H. Wright, A. Raab, J.N. Tabudravu, J. Feldmann, P.F. Long, C.N. Battershill, W.C. Dunlap, B.F. Milne, M. Jaspars *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, **47**(42), 8090. DOI: 10.1002/anie.200802060.
- K.L. Rinchar, V. Kishore, K.C. Bible, R. Sakai, D.W. Sullins, K.-M. Li *J. Nat. Prod.*, 1988, **51**(1), 1. DOI: 10.1021/np50055a001.
- R.J. Capon, C. Skene, E. Lacey, J.H. Gill, D. Wadsworth, T. Friedel *J. Nat. Prod.*, 1999, **62**(9), 1256. DOI: 10.1021/np990144v.
- P. Cimmiello, E. Fattorusso, A. Mangoni, B. Di Blasio, V. Pavone *Tetrahedron*, 1990, **46**(12), 4387. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)86773-9.
- X. Xu, F. He, X. Zhang, J. Bao, Sh. Qi *Food Chem. Toxicol.*, 2013, **53**, 46. DOI: org/10.1016/j.fct.2012.11.037.
- M.J. Vázquez, E. Quiñoa, R. Riguera, A. Ocampo, T. Iglesias, C. Debitus *Tetrahedron Lett.*, 1995, **36**(48), 8853. DOI: 10.1016/0040-4039(95)01837-8.
- W. Inman, P. Crews, R. McDowell *J. Org. Chem.*, 1989, **54**(11), 2523. DOI: 10.1021/jo00272a010.
- P. Wipf, S. Venkatraman, C.P. Miller, S.J. Geib *Angew. Chem. Int. Ed.*, 1994, **33**(14), 1516. DOI: 10.1002/anie.199415161.

20. X.-H. Xu, G.-M. Yao, Y.-M. Li, J.-H. Lu, C.-J. Lin, X. Wang, C.-H. Kong  
*J. Nat. Prod.*, 2003, **66**(2), 285. DOI: 10.1021/np020034f.
21. P.R. Burkholder, R.M. Pfister, F.H. Leitz  
*Appl. Microbiol.*, 1966, **14**(4), 649.
22. E.G. Lyakhova, A.I. Kalinovsky, S.A. Kolesnikova, V.E. Vaskovsky, V.A. Stonik  
*Phytochemistry*, 2004, **65**(18), 2527.  
DOI: 10.1016/j.phytochem.2004.07.005.
23. P. Crews  
*J. Org. Chem.*, 1977, **42**(15), 2634. DOI: 10.1021/jo00435a024.
24. A.G. Guzii, T.N. Makarieva, V.A. Denisenko, P.S. Dmitrenok, Y.V. Burtseva, V.B. Krasokhin, V.A. Stonik  
*Tetrahedron Lett.*, 2008, **49**(50), 7191. DOI: 10.1016/j.tetlet.2008.10.007.
25. T.N. Makarieva, V.A. Stonik, A.S. Dmitrenok, B.B. Grebnev, V.V. Isakov, N.M. Rebachyk, Y.W. Rashkes  
*J. Nat. Prod.*, 1995, **58**(2), 254. DOI: 10.1021/np50116a015.
26. S.A. Avilov, A.I. Kalinovsky, V.I. Kalinin, V.A. Stonik, R. Riguera, C. Jiménez  
*J. Nat. Prod.*, 1997, **60**(8), 808. DOI: 10.1021/np970152g.
27. A.A. Kicha, A.I. Kalinovsky, N.V. Ivanchina, T.V. Malyarenko, P.S. Dmitrenok, A.S. Kuzmich, E.V. Sokolova, V.A. Stonik  
*J. Nat. Prod.*, 2017, **80**(10), 2761.  
DOI: 10.1021/acs.jnatprod.7b00574.
28. S. Himeno, N. Imura  
*J. Health Sci.*, 2000, **46**(6), 393. DOI: 10.1248/jhs.46.393.
29. J.S. Edmonds, K.A. Francesconi  
*Nature*, 1981, **289**, 602. DOI: 10.1038/289602a0.

## Аналитическая химия XXI века: новый облик науки

Ю.А. Золотов

Охарактеризовано общее состояние аналитической химии, отмечены изменения в направлениях ее развития, существенный рост, с одной стороны, объема и сложности решаемых задач, а с другой – ее потенциала. Кратко рассмотрено положение аналитической химии в системе наук, отмечено значительное увеличение ее инструментария. Основное внимание уделено достижениям российских специалистов в этой области, особенно тех, кто был поддержан Российским фондом фундаментальных исследований. Приведены примеры создания новых способов химического анализа, разработки оригинальных подходов к анализу и решению важных прикладных проблем в области медицины, охраны окружающей среды, контроля качества и безопасности пищевых продуктов и фармацевтических препаратов. Сделана попытка оценить перспективы развития аналитической химии в течение ближайших 10–15 лет.

**Ключевые слова:** аналитическая химия, химический анализ, методы анализа, перспективы развития аналитической химии.

### Общий облик аналитической химии

Центр внимания исследователей, работающих в области аналитической химии, уже несколько десятилетий назад стал смещаться от обнаружения и количественного определения химических элементов к разделению, идентификации и определению количественного содержания органических веществ, в том числе биологического происхождения; в настоящее время последним посвящается большая часть научных публикаций. Этот сдвиг сопровождается интенсивной разработкой соответствующих методов и средств анализа – хроматографических, молекулярно-спектроскопических, масс-спектрометрических, биохимических (например, иммунохимических) и других. И если в 1950–1980 годах учебные курсы по аналитической химии посвящались, главным образом, химическим элементам, то сейчас это далеко не так; преподавание аналитической химии, подготовка аналитиков высшей квалификации, естественно, соответствующим образом корректировались.

Однако есть очень обширные и очень важные сферы, для которых элементный анализ продолжает быть (и останется) главным видом химического анализа. В промышленности это, например, металлургия, машиностроение, электроника, индустрия строительных материалов, в сельском хозяйстве – земледелие (анализ почв на содержание азота, фосфора и калия). То же можно сказать о поиске,

разведке и первичной обработке минерального сырья. Соответственно, развиваются методы и средства элементного анализа, прежде всего спектрометрические – рентгено-спектральные, атомно-эмиссионные, атомно-абсорбционные, а также элементная масс-спектрометрия, не говоря уже об устоявшихся – спектрофотометрических или электрохимических, которые сейчас в практике анализа играют меньшую роль.

Едва ли не большее значение, чем изменения в инструментарии, в наборе приоритетных методов анализа имеют развитие и разработка новых общих подходов к анализу, даже новых его парадигм. Здесь имеются в виду анализ без стационарной лаборатории, а в том месте, где находится анализируемый объект; анализ без какого бы то ни было разрушения анализируемого объекта; анализ на расстоянии от объекта, без непосредственного контакта с ним; так называемый вещественный анализ, то есть выявление физических и химических форм, в которых присут-



### ЗОЛОТОВ

**Юрий Александрович**

академик, профессор,  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова



ствуется в объекте интересующий нас компонент (в простейшем случае – выяснение степени окисления элемента и определение содержания его в этих разных степенях); локальный, или распределительный, анализ, то есть выяснение «географии» компонента, его распределения по массе или поверхности образца; непрерывный анализ в потоке жидкости или газа; автоматизация массового анализа однотипных проб.

Примером же смены самой парадигмы анализа может служить «анализ без анализа» – идентификация объекта с использованием «электронного носа» или «электронного языка», когда применяется набор не селективных датчиков, сигналы которых подвергаются математической обработке приемами хемометрики. Можно в скобках уточнить, что понятие идентификации имеет широкий охват: оно относится и к компоненту, и к объекту в целом, как, например, при распознавании, какой тип минеральной воды перед нами.

Подобные символы прогресса заставляют думать о методологии, если угодно – о философии аналитической химии. Эти аспекты не очень интересуют потребителя химического анализа, но существенны для профессионала-исследователя. Например, если 50–70 лет назад в названии нашей науки ключевым словом было, конечно, слово «химия», то теперь акцент подчас делается на «анализ». Аналитическая химия, разумеется, не уходит из химии, поскольку имеет дело с химическими частицами (*species*) – с атомами, ионами, молекулами, фазами; именно эти частицы она должна обнаруживать и определять их содержание. Отход от химии наблюдается в другом – в методах и средствах анализа, и этот отход естественен, он не только оправдан, но и совершенно необходим. И этот отход – вовсе не веление времени, аналитическая химия всегда исходила из принципа «цель оправдывает средства». Первый физический метод анализа применил еще Архимед, который проанализировал золотую корону царя Гиерона II, определив удельные веса чистого золота и короны. Спектральный анализ – обычный физический метод аналитической химии – существует уже полтора столетия. Рентгенофлуоресцентный, инструментальный радиоактивационный методы или метод, основанный на изменении теплопроводности (катарометр как хроматографический детектор), – всё это чисто физические методы, и все они находятся на вооружении современной аналитической химии. Как, впрочем, и многие биохимические методы (и даже некоторые чисто биологические). Цель оправдывает средства.

При этом методы анализа, на чем бы они ни были основаны, встраиваются в жесткую систему, формируемую аналитической химией, где уже действуют законы самой этой науки. В этой системе: выявление мешающих влияний и их устранение; правила градуирования; оценка диапазона содержаний, где метод работает, и объектов, к анализу которых он применим; оценка воспроизводимости результатов; оценка сопрягаемости с методами подготовки проб; «технологичность» изготовления средств анализа, их ресурс, «технологичность» самой процедуры анализа и т. д.

Со временем менялась дефиниция аналитической химии. Вот, к примеру, как характеризовал аналитическую химию в 1949 году профессор Ю.А. Клячко [1]. «Анализ химического состава вещества, каким бы способом измерения он ни проводился, всегда может быть отнесен к области аналитической химии, *если в процессе анализа осуществляются специальные химические реакции*». Через 40–50 лет тот же Ю.А. Клячко предлагает следующее определение [2]: «Аналитическая химия – наука о принципах и технологии качественного и количественного анализа химического состава и химической структуры веществ и материалов». Уже нет столь жесткой привязки к химии. Аналитическая химия – это наука, создающая и развивающая общую методологию, принципы, методы и средства определения химического состава и химической структуры вещества, а также разрабатывающая способы анализа различных объектов (несколько измененное определение, ранее опубликованное в книге [3]).

Между прочим, чтобы не быть жестко привязанной только к химии, аналитическая химия в настоящее время часто фигурирует под другими названиями: Analytical Sciences, Analytik (нем.), Аналитика. Фундаментальный же аспект (или один из фундаментальных аспектов) аналитической химии находится в области поиска явлений, закономерностей, свойств, из которых можно «выжать» новый прием, новый метод анализа, получить возможность улучшить характеристики уже известных и т. п.

Между прочим, чтобы не быть жестко привязанной только к химии, аналитическая химия в настоящее время часто фигурирует под другими названиями: Analytical Sciences, Analytik (нем.), Аналитика.

Фундаментальный же аспект (или один из фундаментальных аспектов) аналитической химии находится в области поиска явлений, закономерностей, свойств, из которых можно «выжать» новый прием, новый метод анализа, получить возможность улучшить характеристики уже известных и т. п.

### Направления развития и некоторые достижения российской аналитической химии

Успехи аналитической химии огромны, очень значителен ее вклад в прогресс многих наук (геном человека расшифровали, используя масс-спектрометрию и частично – капиллярный электрофорез), не говоря уже о решениях в сфере контроля технологических процессов или объектов окружающей среды, контроля качества и безопасности множества продуктов производства – от жаропрочной стали до аспирина, обнаружения отравляющих веществ или взрывчатки. За ряд методов анализа присуждены Нобелевские премии:

- масс-спектрометрия, изотопный анализ, Ф. Астон, 1922 г.;
- микрометоды элементного анализа органических веществ, Ф. Прегль, 1923 г.;
- изотопные методы, радиоактивационный анализ, Д. Хевеши, 1943 г.;
- электрофоретический и адсорбционный анализ белков, А. Тиселиус, 1948 г.;
- распределительная хроматография, А. Мартин и Р. Синдж, 1952 г.;
- полярография, Я. Гейровский, 1959 г.;
- радиоиммунный анализ, Р. Ялоу, 1977 г.;
- новые варианты масс-спектрометрического анализа, К. Танака и Дж. Фенн, 2002 г.

В нашей стране выполнено немало оригинальных исследований, обогативших мировую аналитическую химию; самые крупные достижения отражены в недавно изданной монографии «Российский вклад в аналитическую химию» [4, 5] (рис. 1).

Существенное значение имеют новые методы и средства высокочувствительного дистанционного обнаружения взрывчатых веществ. Так, в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск) достигнут предел обнаружения паров тринитротолуола ( $10^{-15}$  г/см<sup>3</sup>), на два порядка более низкий, чем у известных в мире средств (В.М. Грузнов и другие). В Институте оптики атмосферы им. В.В. Зуева

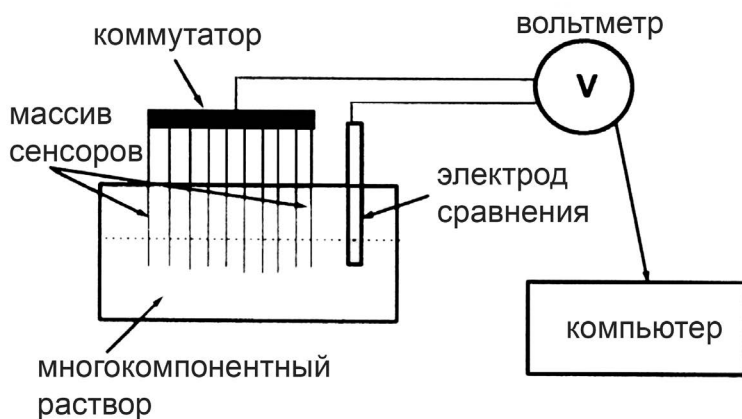


Рис. 2. Схема «электронного» языка на основе потенциометрических сенсоров.

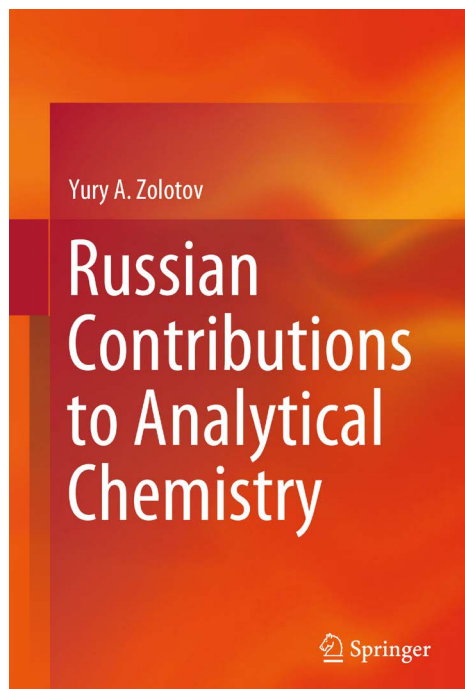


Рис. 1. Обложка книги об основных достижениях российских аналитиков.

РАН разработан лидарный метод обнаружения микрочастиц взрывчатки на весьма существенном расстоянии; эта работа отмечена в 2019 году премией Президента Российской Федерации для молодых ученых.

Большой интерес вызывают результаты исследований в области уже упоминавшихся систем типа «электронный язык» и «электронный нос». Такие системы позволяют проводить идентификацию жидких и газообразных веществ, например, типов чая или кофе после их заварки, оценивать пригодность пищевых продуктов по газовой фазе над ними и т. д. Подобные работы проводятся в Санкт-Петербургском (школа профессора Ю.Г. Власова), в Башкирском (В.Н. Майстренко) и Саратовском (Е.Г. Кулагина) государственных университетах, в Воронежском государственном университете инженерных технологий (Т.А. Кучменко) (рис. 2).

В Самарском государственном аэрокосмическом университете им. С.П. Королева (И.А. Платонов и др.) разработан необычный газовый хроматограф, отличающийся, помимо прочего, очень небольшими размерами (рис. 3).

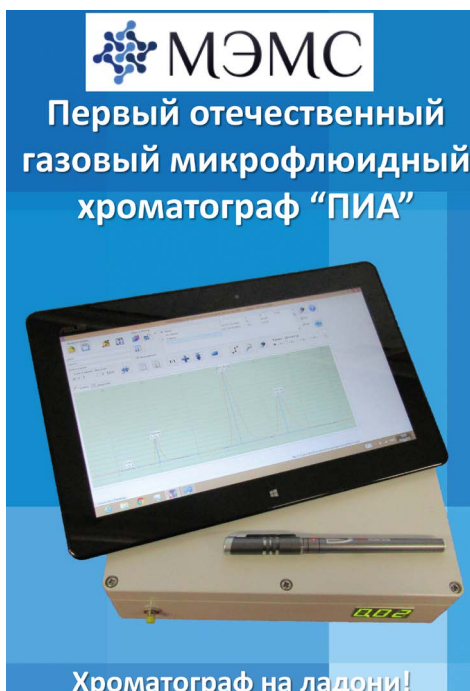


Рис. 3. Портативный микрофлюидный газовый хроматограф (рекламная листовка).

Новый вариант масс-спектрометрического анализа (SALDI) развит группой, включающей сотрудников Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (А.А. Гречников) и Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Вообще СССР, Россия внесли существенный вклад в развитие масс-спектрометрического метода анализа: масс-рефлектор Б.А. Мамырина, ортогональный ввод пробы А.Ф. Додонова, метод ЭРИАД Л.Н. Галль (электрораспыление как способ ионизации), фотохимическая ионизация при атмосферном давлении И.А. Ревельского и др. Конечно, эти работы сделаны не вчера, но и в настоящее время ряд групп ведут исследования на высоком уровне. Помимо упомянутых работ по методу SALDI, это формирование «элементного ЭРИАД» в Институте аналитического приборостроения РАН (Л.Н. Галль и др.), достижение очень высоких разрешений с использованием ионного циклотронного резонанса (Е.Н. Николаев), интересные приложения молекулярной и элементной масс-спектрометрии к решению био-

логических, экологических и геологических задач (А.Т. Лебедев, М.А. Большов, В.К. Карандашев и др.).

Сформировалось направление, которое в нашей стране (в 2007 году) было названо наноаналитикой. Имеется в виду не столько анализ нанообъектов, сколько использование наночастиц и нанотехнологий для анализа обычных объектов. В частности, используется полоса поверхностного плазмонного резонанса для определения биоактивных органических соединений спектрофотометрическим методом (С.Г. Дмитриенко, В.В. Апяри, МГУ им. М.И. Ломоносова), в разных направлениях применяются наномицеллы (С.Н. Штыков, Саратовский университет; А.В. Пирогов, МГУ и др.), создаются новые сорбенты, неподвижные фазы для высокоэффективной жидкостной хроматографии, содержащие наночастицы золота (О.А. Шпигун и его группа, МГУ).

Во многих случаях желательно, хотя бы на первом этапе анализа, не определять каждый компонент из серии более или менее однотипных компонентов (разные фенолы или полиароматические соединения в водах, различные тяжелые металлы), а оценивать их суммарно. Это называется «определять интегральные показатели». Методологию этого вида анализа успешно развивает В.И. Вершинин в Омском государственном университете и другие группы. Если тест на сумму показывает отрицательный результат, нет нужды проводить покомпонентный анализ.

Заметное место на фронте передовых исследований занимают разработки химических и особенно биосенсоров. Исследования в области биосенсоров проводятся в Казанском (Приволжском) федеральном университете (Г.К. Будников, Г.А. Евтюгин, Э.П. Медянцева и другие), в Московском университете (А.А. Карякин) и в других местах. Результаты отражаются в большом числе публикаций в хороших журналах, а Г.А. Евтюгин написал монографию [6]. Монографию об ионоселективных электродах (а это химические сенсоры) издал К.Н. Михельсон из Петербургского университета [7].

И еще о заметных книгах, уже на другие темы. Б.Л. Мильман написал монографию об идентификации химических соединений [8], а А.Т. Лебедев – о масс-спектрометрии в органической химии [9].

### Примеры решений, достигнутых при выполнении проектов Российского фонда фундаментальных исследований

Хотелось бы теперь привести несколько совсем уж живых примеров хороших работ, выполненных по конкретным проектам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Много исследований по проектам проводится в последнее время с целью создания новых методов

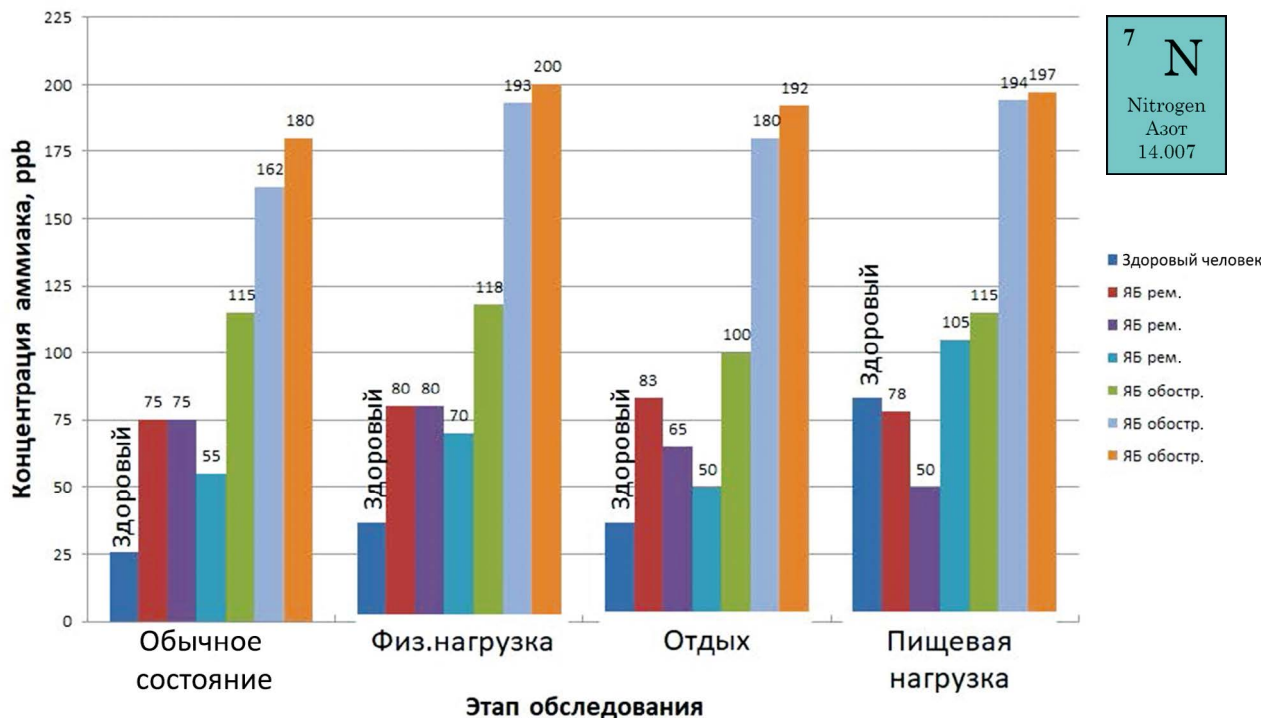


Рис. 4. Содержание аммиака в выдыхаемом воздухе человека в различных ситуациях. Использована диодно-лазерная спектроскопия (работа сотрудников Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН). ЯБ – язвенная болезнь желудка, рем. – состояние ремиссии, обостр. – острая стадия болезни.

обнаружения и определения биологически активных веществ для: 1) диагностики заболеваний (рис. 4), 2) оценки качества и безопасности пищи, 3) оценки безопасности объектов окружающей среды, 4) оценки подлинности и качества фармпрепаратов.

Способы неинвазивной диагностики состояния человека по запаху биопроб успешно разрабатывает Т.А. Кучменко в упоминавшемся уже Воронежском государственном университете инженерных технологий. Татьяна Анатольевна заведует в этом университете кафедрой физической и аналитической химии, она член бюро Научного совета РАН по аналитической химии, профессор РАН. А Ирина Юрьевна Горячева на кафедре общей и неорганической химии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского для диагностики рака легких создает наносенсоры на основе люминесцентных квантовых точек; при этом детектируются циркулирующие микро-РНК. Ирина Юрьевна постоянно выигрывает гранты РФФИ, поскольку работает «на передовой» и на самом современном уровне. Кстати, часть ее работ – это элементы той самой наноаналитики, о которой шла речь выше.

Примером проектов, нацеленных на анализ объектов окружающей среды, могут быть проекты Татьяны Юрьевны Русановой (заведующая кафедрой аналитической химии и химической экологии Саратовского университета) по разработке биосенсорных систем на основе наноразмерных материалов; систе-

мы позволяют обнаруживать токсичные вещества в воде. Петр Сергеевич Федотов из Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН успешно занимается нано- и микрочастицами почв, пыли, пепла, он научился их фракционировать, что важно, например, при оценке подвижности форм элементов в окружающей среде. Для определения биологически важных соединений Геннадий Артурович Евтюгин, заведующий кафедрой аналитической химии Казанского (Приволжского) федерального университета, по проекту РФФИ разрабатывает новые хеморезисторные структуры.

«География» науки. Конференции

Можно назвать несколько центров в стране, где аналитическая химия успешно развивается; сотрудники многих из них получали гранты РФФИ. Среди академических институтов это Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, Институт нефтехимического синтеза им. Н.С. Наметкина, Институт химии

высокоочищенных веществ им. Г.Г. Девятовых, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, Институт аналитического приборостроения. Среди вузов – Московский, Санкт-Петербургский, Саратовский, Кубанский, Воронежский, Омский, Нижегородский, Иркутский государственные университеты, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Липецкий государственный технический университет, Воронежский государственный университет инженерных технологий и другие. Среди отраслевых НИИ – Институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Всероссийский институт метрологии им. Д.И. Менделеева и другие.

Регулярно организуемые при поддержке РФФИ всероссийские и региональные съезды и конференции по аналитической химии, а также молодежные школы-конференции во многом способствуют развитию отечественной аналитической химии, позволяют сопоставлять уровни и масштаб исследований, сравнивать наши успехи с достижениями зарубежных коллег. Чаще всего организатором этих мероприятий выступает Научный совет РАН по аналитической химии.

### **Перспективы развития аналитической химии**

К основным направлениям развития аналитической химии как науки на ближайшие 10–15 лет можно отнести следующие.

1. Поиск и исследование новых свойств веществ, явлений, закономерностей, которые могут быть положены в основу принципиально новых методов и средств химического анализа, в том числе многокомпонентного и высокоселективного. Этот поиск сопряжен с расширением перечня областей науки и техники, достижения которых могут быть использованы; помимо химии и физики, в этот перечень уже сейчас

входят, например, математика, биохимия, ряд направлений техники.

2. Интенсивное развитие и использование методов и средств внелабораторного («полевого») анализа, в частности за счет разработки эффективных, но простых в использовании средств оперативного анализа биомедицинских объектов, определения содержания компонентов пищевых продуктов, быстрого обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков и т. д.

3. Миниатюризация анализа, в том числе разработка, с одной стороны, малогабаритных универсальных аналитических приборов, например с использованием микрофлюидных и других систем, с другой – простых анализаторов; миниатюризация за счет уменьшения массы и объемов проб.

4. Развитие вещественного анализа, то есть методов и средств распознавания и количественного определения различных химических и физических форм существования интересующих аналитика компонентов (состояния окисления элементов, разных химических соединений элемента, энантиомеров; растворенных, коллоидных или сорбированных форм и т. д.).

5. Развитие прямого (неразрушающего) анализа твердых веществ, главным образом на пути использования физических явлений.

6. Дальнейшее развитие методов и средств локального и дистанционного анализа.

7. Развитие способов идентификации веществ на основе оценки обобщенных показателей с использованием математических (хеометрических) приемов распознавания образов (вместо обычного покомпонентного анализа).

8. Создание и широкое использование непрерывно действующих химических сенсоров, например, для оценки состава воздуха в производственных и жилых помещениях.

9. Автоматизация массового анализа, особенно на базе широкой компьютеризации; составные части этого процесса – дальнейшая автоматизация измерительных приборов и систем пробоподготовки

10. Расширение и укрепление уже сложившегося сегмента аналитической химии, называемого наноаналитикой, внедрение в практику уже разработанных наноаналитических методов.

11. Развитие метрологии химического анализа и близких к ней направлений (разработка абсолютных методов определения, совершенствование систем градуирования и способов обработки результатов анализа и т. д.).

12. Дальнейшее развитие и совершенствование спектроскопических, масс-спектрометрических, хроматографических, электрохимических, биохимических, термических и других методов анализа. Все

более важную роль будет играть интеграция методов и создание соответствующих устройств (комбинированные, гибридные методы).

13. Развитие методов и средств пробоподготовки – для разложения проб, разделения смесей, выделения и концентрирования целевых компонентов.

14. Создание новых способов анализа важнейших объектов и развитие аналитической химии ключевых аналитов; к числу важнейших объектов будут относиться биомедицинские материалы, пищевые продукты, фармацевтические препараты; к ключевым аналитам – компоненты биологических жидкостей и тканей, пестициды, отравляющие и взрывчатые вещества, растворенный кислород и др. В анализе «классических» объектов (минеральное сырье, металлы, нефть и т. п.) будут расширяться исследования в области вещественного и неразрушающего анализа, автоматизации и так далее.

15. При решении практических задач, например, анализа объектов окружающей среды, возможно более широкое использование многоступенчатого ана-

лиза со скринингом и отбраковкой проб на первых стадиях.

16. Успешное продвижение в указанных и других направлениях требует обеспечения лабораторий эффективным аналитическим оборудованием. Для обучения работе на сложных, дорогостоящих приборах целесообразно создание системы компьютерных тренажеров.

В заключение можно констатировать, что российская аналитическая химия развивается в целом успешно, многие полученные результаты занимают достойное место в мировой науке. Этому, в частности, способствует поддержка со стороны федеральных научно-технических программ и научных фондов, прежде всего РФФИ, которому благодарно наибольшее число исследователей.

## Литература

- 1 Ю.А. Клячко  
Заводск. лаборатория, 1949, 15, 759.
- 2 Ю.А. Клячко  
Журн. аналит. химии, 1996, 51, 569.
- 3 Ю.А. Золотов  
Введение в аналитическую химию, РФ, Москва, Лаборатория знаний, 2015, 263 с.
- 4 Ю.А. Золотов  
Российский вклад в аналитическую химию, РФ, Москва, PRESS-BOOK, 2017, 190 с.
- 5 Yu. Zolotov  
Russian Contribution to Analytical Chemistry, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer Nature, 2018, 162 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-98791-0.
- 6 G. Evtuyugin  
Biosensors: Essential, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2014.  
DOI: 10.1007/978-3-642-40241-8.
- 7 K.N. Mikhelson  
Ion-Selective Electrodes, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2013, 162 pp.  
DOI: 10.1007/978-3-642-36886-8.
- 8 B.L. Milman  
Chemical Identification and its Quality Assurance, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2011, 281 pp.  
DOI: 10.1007/978-3-642-15361-7.
- 9 А.Т. Лебедев  
Масс-спектрометрия в органической химии: Изд. 2-е, перераб. и доп., РФ, Москва, Техносфера, 2015, 704 с.

## English

# Analytical Chemistry of the 21st Century: New Face of the Science

**Yuri A. Zolotov**  
Academician, Professor,  
Lomonosov Moscow State University  
1/3, Leninskie Gory, GSP, Moscow, 119234, Russia  
zolotov.32@mail.ru

## Abstract

The paper constitutes a review of the analytical chemistry general state, changes in its development trends, as well as substantial rise of both its tasks volume and complexity and its potential. The place that the analytical chemistry takes among other sciences is briefly considered, and its instrumentation improvement is noted. Author focuses on the russian scientists' advances in this sphere, particularly those whose investigation were supported by the Russian Foundation for Basic Research. Examples of the new analytical methods creation, the original analytical approaches development and the important applied tasks solution in spheres of medicine, environmental protection and the food and medicines quality and safety control are given. Author attempts to forecast the analytical chemistry development prospects for the next 10–15 years.

**Keywords:** analytical chemistry, chemical analysis, methods of analysis, prospects of analytical chemistry development.

Images & Tables

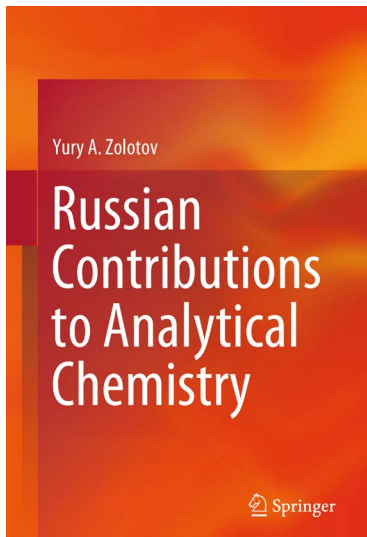


Fig. 1. Cover of the book on main achievements of Russian analysts.

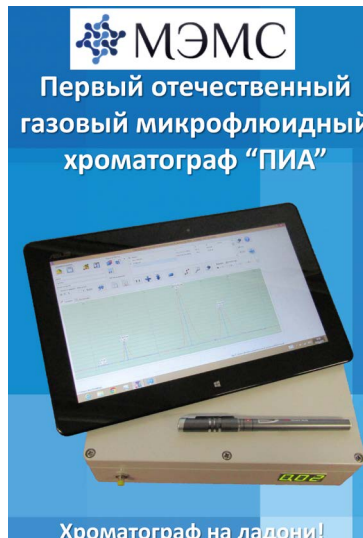


Fig. 3. Portable microfluidic gas chromatograph (leaflet).

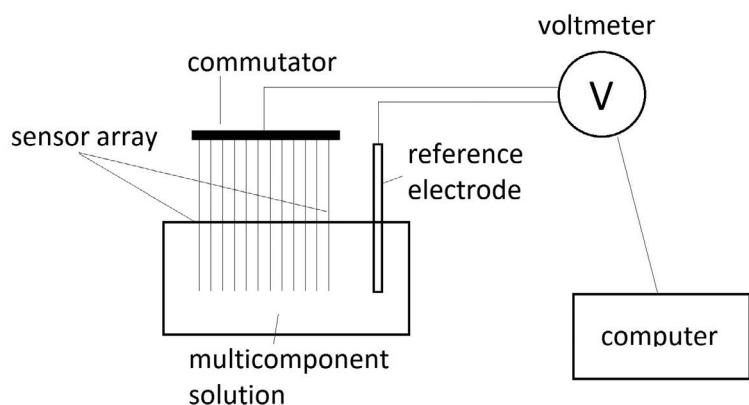


Fig. 2. Scheme of "electronic tongue" based on potentiometric sensors.

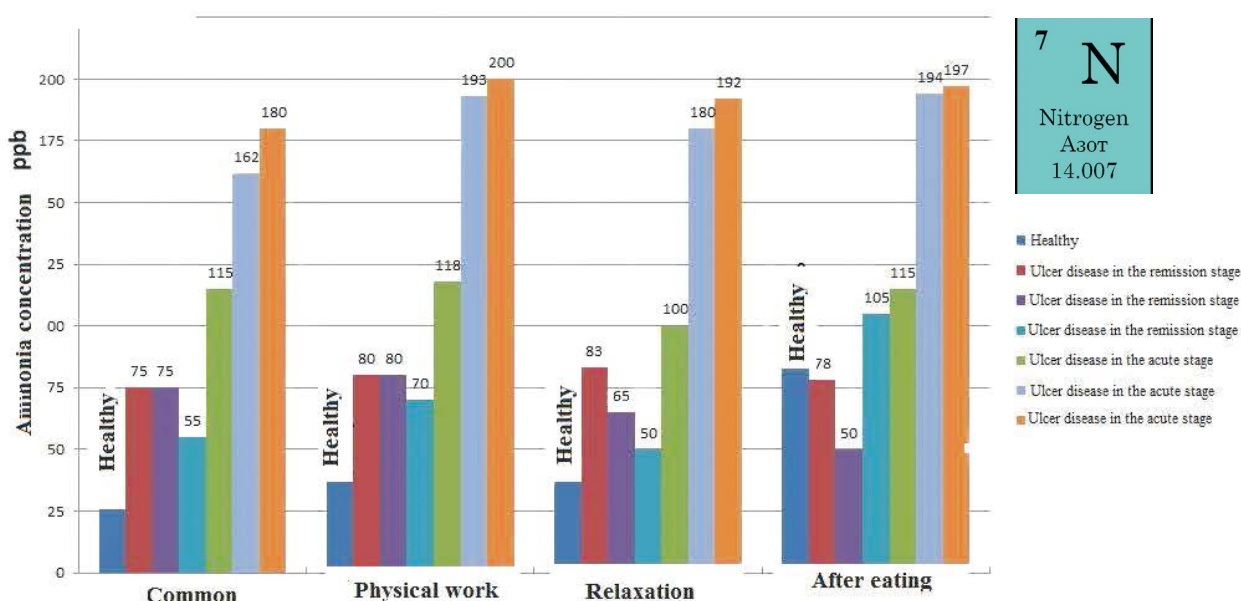


Fig. 4. Ammonia content in the air exhaled by an individual in a range of situations. Diode-laser spectroscopy was used in the experiments (the work was presented by the Prokhorov Institute of General Physics staff).

## References

- 1 **Yu.A. Klyachko**  
*Zavodsk. Lab.*, 1949, **15**, 759 (in Russian).
- 2 **Yu.A. Klyachko**  
*Zhur. Analyt. Khim.*, 1996, **52**, 569 (in Russian).
- 3 **Yu.A. Zolotov**  
*Vvedenie v analiticheskuyu khimiyu [Introduction in Analytical Chemistry]*, RF, Moscow, Laboratoriya znaniy, 2015, 263 pp. (in Russian).
- 4 **Yu.A. Zolotov**  
*Rossiiskii vklad v analiticheskuyu khimiyu [Russian Contribution to Analytical Chemistry]*, RF, Moscow, PRESS-BOOK, 2017, 190 pp. (in Russian).
- 5 **Yu.A. Zolotov**  
*Russian Contribution to Analytical Chemistry*, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer Nature, 2018, 162 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-98791-0.
- 6 **G. Evtuyugin**  
*Biosensors: Essential*, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-40241-8.
- 7 **K.N. Mikhelson**  
*Ion-Selective Electrodes*, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2013, 162 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-36886-8.
- 8 **B.L. Milman**  
*Chemical Identification and its Quality Assurance*, FRG, Berlin-Heidelberg, Springer, 2011, 281 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-15361-7.
- 9 **A.T. Lebedev**  
*Mass-spektrometriya v organicheskoy khimii: Izd. 2 [Mass Spectrometry in Organic Chemistry: the 2nd Ed.]*, RF, Moscow, Technospere, 2015, 704 pp. (in Russian).









**«ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО ФОНДА  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»  
№ 1 (101) январь–март 2019 года**

Подписано в печать 24.04.2019. Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Буки Веди»  
115093, г. Москва, Партийный переулок, д. 1, корп. 58, стр. 3, пом. 11  
Тел.: (495) 926-63-96,  
[www.bukivedi.com](http://www.bukivedi.com), [info@bukivedi.com](mailto:info@bukivedi.com)