

# ПРИРОДА

2 2019

«Мы приблизились к границам применимости периодического закона»

Интервью с Ю. Ц. Оганесяном

1 H hydrogen 1.00794(7)	2 He helium 4.0026																
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.0122(2)	5 B boron 10.81 [10.806, 10.821]	6 C carbon 12.011 [12.009, 12.012]	7 N nitrogen 14.007 [14.006, 14.008]	8 O oxygen 15.999 [15.999, 16.000]	9 F fluorine 18.998	10 Ne neon 20.180										
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.304(6)	13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(8)	15 P phosphorus 30.973762(5)	16 S sulfur 32.06(5)	17 Cl chlorine 35.45(3)	18 Ar argon 39.948(1)										
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(2)	22 Ti titanium 47.88(7)	23 V vanadium 50.9415(2)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938044(7)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.630(8)	33 As arsenic 74.9216(2)	34 Se selenium 78.9718(8)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90584(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.94(1)	43 Tc technetium [98]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.91(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(4)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(8)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.757(3)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90509(2)	54 Xe xenon 131.29(4)
55 Cs caesium 132.905451962(3)	56 Ba barium 137.327(7)	57-71 La-Lu lanthanoids	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.94788(2)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(4)	77 Ir iridium 192.222(3)	78 Pt platinum 195.084(8)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.38(3)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.9804(1)	84 Po polonium [209]	85 At astatine [210]	86 Rn radon [222]
87 Fr francium [223]	88 Ra radium [226]	89-103 Ac-Lr actinoids	104 Rf rutherfordium [261]	105 Db dubnium [262]	106 Sg seaborgium [263]	107 Bh bohrium [264]	108 Hs hassium [265]	109 Mt meitnerium [266]	110 Ds darmstadtium [267]	111 Rg roentgenium [268]	112 Cn copernicium [269]	113 Nh nihonium [270]	114' Fl flerovium [271]	115 Mc moscovium [272]	116 Lv livermorium [273]	117 Ts tennessine [274]	118 Og oganesson [276]

Международный год  
Периодической таблицы  
химических элементов



Главный редактор  
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора  
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурин**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A. Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T. Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E. Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноуцько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

## В НОМЕРЕ:

---

### 3 МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

4 Интервью с Ю.Ц.Оганесяном  
**«Мы приблизились к границам применимости периодического закона»**

12 Интервью с В.В.Луниным  
**Созидание «лестницы» химического образования**

17 Интервью с Е.В.Антиповым, Е.В.Бабаевым, В.П.Зломановым, А.В.Ивановым, А.А.Карякиным, А.В.Шевельковым, А.В.Яценко  
**Химики о Периодической таблице: профессиональный инструмент, научная икона, открытая книга?**

34 И.С.Дмитриев  
**Открытие периодического закона: три загадки и одна легенда**

---

44 А.Ю.Леин  
**Метан в Черном море**  
В тектонически и морфологически нарушенных участках дна Черного моря обнаружены выходы метана в составе грязевых вулканов, залежей газгидратов и в виде холодных газово-пузырьковых струй — метановых сипов.

---

49 К.М.Пац, Ю.Б.Порозов  
**CIS-белок — новая мишень в иммунотерапии рака, или Следствие ведут биоинформатики**  
Открытие механизмов подавления негативной иммунорегуляции (т.е. ингибирования контрольных точек, или чекпойнтов) привело к определенному прорыву в терапии онкологических заболеваний. В статье приводятся результаты компьютерного моделирования, проведенного для изучения функций нового чекпойнта (CIS-белка) и поиска его ингибитора.

---

---

55 Т.А.Кузнецова, М.В.Вечерский, А.А.Степаньков

### **Микробиом ходов короедов: новые метагеномные данные**

При заселении деревьев короедами существенно изменяется микробное сообщество субкортикального слоя: в грибном сообществе увеличивается доля сахаролитических дрожжей, а в бактериальном происходит сдвиг в сторону доминирования семейства Enterobacteriaceae и Pseudomonadaceae.

---

60 А.А.Лукашов  
**Псевдокарст на Лессовом плато: аномальные проявления**

В западной части Лессового плато Китая, на правом берегу Хуанхэ, находится район с необычными проявлениями псевдокарста. Здесь повсеместно распространены овраги, рывины и цепочки из воронок и отвесных провалов. Откуда они взялись и как связаны с землетрясениями, случившимися здесь в начале XX в.?

---

70 К.В.Верховов, С.В.Рыбальченко  
**Формирование оползней-потоков на отвалах угледобывающих предприятий**  
На внешних отвалах угледобывающих предприятий развиваются опасные склоновые процессы, в результате чего образуются оползневые потоки громадных объемов, которые покрывают значительные площади.

---

77 **НАУКА И ОБЩЕСТВО**  
М.Д.Голубовский  
**Даниил Гранин и наука: открытие А.А.Любищева и Н.В.Тимофеева-Ресовского К 100-летию Д.А.Гранина**

---

87 **ВРЕМЕНА И ЛЮДИ**  
М.В.Родкин  
**Более полувек с «Природой»**

---

92 **НОВЫЕ КНИГИ**

---

## CONTENTS:

---

### 3 INTERNATIONAL YEAR OF THE PERIODIC TABLE OF CHEMICAL ELEMENTS

4 Interview with Y.T.Oganessian

#### **“We Have Come Close to the Limits of Applicability of the Periodic Law”**

12 Interview with V.V.Lunin

#### **About the Ladder of Modern Chemical Education**

17 E.V.Antipov, E.V.Babaev, V.P.Zlomanov, A.V.Ivanov, A.A.Karyakin, A.V.Shevelkov, A.V.Yatsenko

#### **Chemists on the Periodic Table: a Professional Tool, a Scientific Icon, or an Open Book?**

34 I.S.Dmitriev

#### **The Discovery of the Periodic Law: Three Puzzles and a Legend**

---

44 A.Yu.Lein

#### **Methane in the Black Sea**

The article summarized distribution patterns of focused at the bottom of the. In tectonically and morphologically disturbed areas of the Black Sea bottom methane outflows were discovered as a part of mud volcanoes, gas hydrates deposits and gas-bubble jets, methane seeps.

---

49 K.M.Pats, Yu.B.Porozov

#### **CIS is a New Target Protein in Immune-Oncology, or Investigation Held by Bioinformatics**

Discovery of mechanisms of negative immunoregulation suppression (i.e., inhibition of immune checkpoints) has led to a definite breakthrough in the cancer treatment. We present the results of a computer simulation conducted to study the functions of a new checkpoint (CIS-protein) and search for its inhibitor.

---

55 T.A.Kuznetsova, M.V.Vecherskii, A.A.Stepan'kov

#### **Microbiome of Bark Beetles: New Metagenomic Data**

After colonization of trees by bark beetles, the microbial community of the subcortical layer changes significantly: the proportion of saccharolytic yeast increases in fungal community, and the shift towards the dominance of the families Enterobacteriaceae and Pseudomonadaceae were observed in the bacterial one.

---

60 A.A.Lukashov

#### **Pseudokarst in the Loess Plateau: Anomalous Features**

Within the western part of the Chinese Loess Plateau, on the right side of the Yellow River there is a region with a presence of anomalous pseudokarst features. Ravines, gullies and numerous linear chains of close depressions are widespread here. The questions on their origin and relation related to earthquakes of the beginning of the 20th century are of particular interest.

---

70 K.V.Verkhovov, S.V.Rybalchenko

#### **Formation of Landslides-Flows on Dumps of Coal-Mining Enterprises**

Dangerous slope processes develop on the rock dumps of coal-mining enterprises. They result in huge landslide flows, which cover large areas.

---

### 77 SCIENCE AND SOCIETY

M.D.Golubovskii

#### **Daniil Granin and Science: the Discovery of A.A.Lyubishchev and N.V.Timofeev-Resovsky**

To the 100th anniversary of D.A.Granin

---

### 87 TIMES AND PEOPLE

M.V.Rodkin

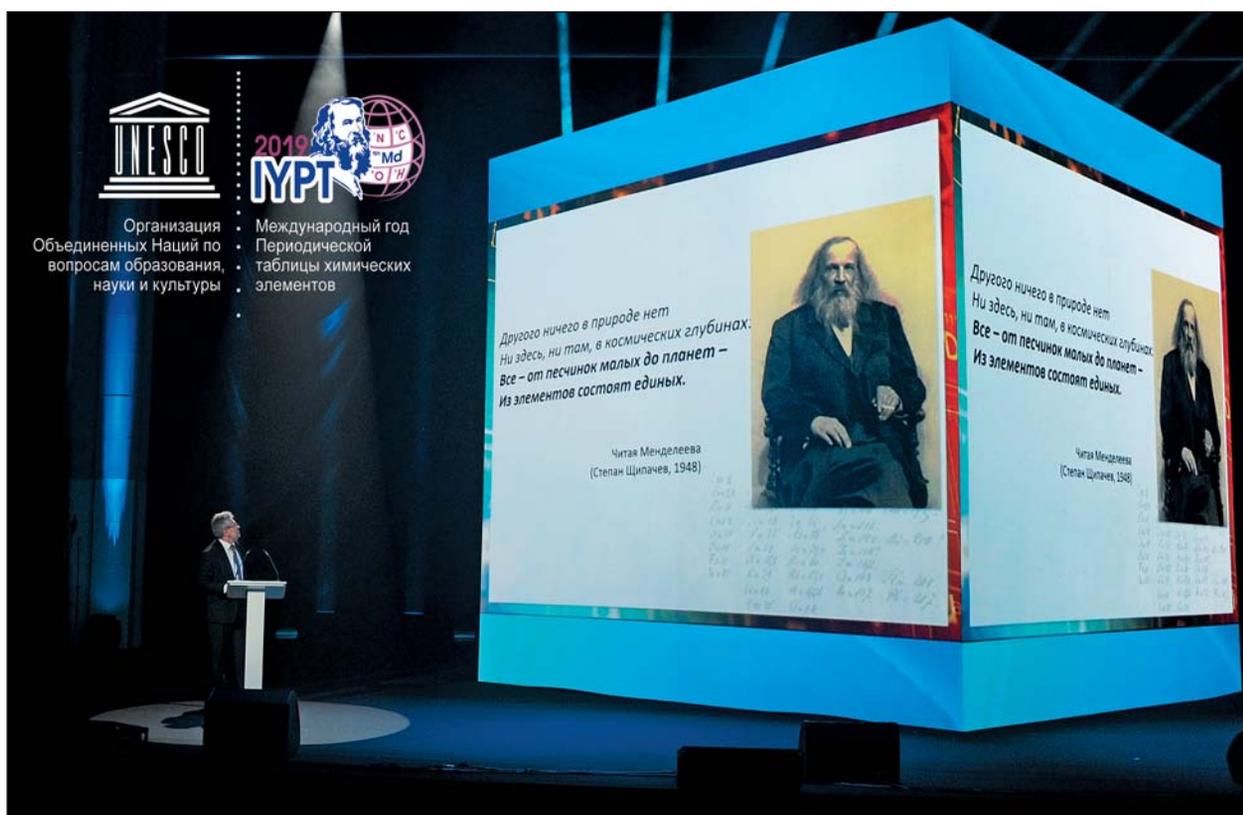
#### **More than Half a Century with “Priroda”**

---

### 92 NEW BOOKS

---

# МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД Периодической таблицы химических элементов



Выступление Президента РАН А.М.Сергеева на церемонии открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов в России. 6 февраля 2019 г.

Фото предоставлено пресс-службой Всероссийского фестиваля науки НАУКА 0+

**В 2019 г. исполняется 150 лет с момента открытия периодического закона, и в честь этого события весь мир под патронажем Организации Объединенных Наций отмечает Международный год Периодической таблицы химических элементов.**

Мы вновь и вновь обращаемся к эпизоду открытия периодического закона Д.И.Менделеевым: эта страница истории науки неизменно вызывает волнение и восхищение исследователей, особенно специалистов, постоянно работающих с Периодической таблицей химических элементов. Предсказанные великим русским ученым «надстройки и развитие» периодического закона стали возможны благодаря современным достижениям атомной физики, химии, астрофизики. Периодическая таблица химических элементов позволила выработать универсальный язык, который связывает специалистов, решающих сложные задачи в области химии, кристаллографии, геохимии, биохимии, медицины... В течение юбилейного года ученые будут рассказывать об этих исследованиях в специальной рубрике. И открывает разговор серия эксклюзивных интервью, подготовленных редакцией «Природы».

# «Мы приблизились к границам применимости периодического закона»

Интервью с академиком РАН Ю.Ц.Оганесяном

Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н.Флёрва Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия)

**Н**акануне торжественного открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов академик Ю.Ц.Оганесян рассказал редактору «Природы» о выводах, сделанных учеными при исследовании свойств сверхтяжелых элементов, и о своем видении перспектив работы Фабрики сверхтяжелых элементов.

**Юрий Цолакович, почему юбилей открытия периодического закона так важен для всего мира? И что он означает для Вас, для Ваших коллег: это — праздник, подтверждение высокой роли естественнонаучного сообщества? Мемориальный год (как его часто называют в печати) поможет решить перспективные научные задачи?**

Мы говорим о событии действительно важном и экстраординарном. Открытие 150-летней давности актуально и сегодня, что случается нечасто. Периодическая таблица химических элементов, которую называют «иконой химиков», в XXI в. ставит задачи на переднем крае науки. Крупнейшие ядерные центры России, США, Германии, Японии, Франции, Китая включают в свои основные программы синтез и исследование новых химических элементов, обсуждают границы Периодической таблицы и пределы применимости периодического закона. На разработку таких тем тратятся значительные средства, создаются новые лаборатории, строятся новые установки, ускорительные комплексы. С этим связаны большие планы разных научных групп, работающих многие годы в тесном международном сотрудничестве. Во всем мире проводятся симпозиумы, конференции, посвященные Периодической системе элементов, которая и спустя полтора века продолжает волновать исследователей всего мира.

Все это свидетельство того, что темой Международного года стало явление неординарное. Мы и сегодня ищем ответы на вопросы, которые перед нами ставит Периодическая таблица химических элементов.



Ю.Ц.Оганесян.

Здесь и далее фото из фотоархива  
Объединенного института ядерных исследований

**В таком случае «мемориальный» — неподходящее слово. Расскажите, пожалуйста, подробнее об актуальных вопросах, связанных с Периодической таблицей. Речь идет о свойствах новых химических элементов?**

Прежде чем дальше вести нашу беседу, позвольте мне ознакомить читателей журнала с общим положением дел в области, которую мы будем обсуждать.

Из планетарной модели атома Э.Резерфорда (1911) мы знаем, что атом состоит из плотного ядра (в котором сосредоточена практически вся его масса и весь его положительный заряд) и электронов,двигающихся вокруг ядра на большом рассто-

янии. Ядро, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов, близко расположенных друг к другу. Их связь возникает под действием короткодействующих ядерных сил, нам пока неизвестных. Строгой теории сильных взаимодействий нет. Поэтому описание ядерной материи базируется на различных теоретических моделях. Их области применения ограничены, и предсказания могут сильно отличаться друг от друга.

Наоборот, электромагнитные силы, хотя и в сотни раз слабее ядерных, дальнедействующие, нам хорошо известны. Поэтому описание движения электронов вокруг зарядового центра (ядра атома) базируется на строгой теории — квантовой электродинамике. Свое начало эта наука берет еще от модели атома Н.Бора (1913), уравнения движения электрона в электрическом поле П.Дирака (1925), последующих работ Д.Хартри, В.А.Фока и др. В рамках квантовой электродинамики таблицу Менделеева можно рассчитать в детальных подробностях, что делалось неоднократно в так называемом нерелятивистском приближении, вплоть до элемента с атомным номером 172.

Поэтому ответ на вопросы, сколько может быть элементов в Периодической таблице и как определяются ее границы, мы должны дать с двух позиций — ядерной физики и атомной физики. Попытаемся это сделать.

В первом случае мы скажем: атом (элемент) есть, пока существует ядро с периодом полураспада не менее  $10^{-14}$  с (время, необходимое для того, чтобы вокруг ядра образовалась соответствующая электронная структура атома). Во втором формулируем так: атом (элемент) существует до тех пор, пока никакие дополнительные (ранее неучтенные) эффекты не изменят предсказаний квантовой электродинамики.

За всю почти 80-летнюю историю искусственного синтеза трансурановых элементов ответ на первый вопрос приходил тогда, когда открывали очередной способ синтеза все более тяжелых ядер. Сначала это были пучки легких частиц — протонов и дейтронов, потом мощные потоки нейтронов (реакторы и даже ядерные взрывы), затем пучки тяжелых ионов с массой до 20 атомных масс, реакции под действием массивных ионов (холодное слияние), наконец, пучки нейтронно-избыточных ионов кальция-48 ( $^{48}\text{Ca}$ ). Отметим, что за это время экспериментальные результаты радикально повлияли на теорию. На смену классической модели ядерной заряженной жидкой капли, с пределом существования элементов до  $Z = 100$ , пришла микроскопическая модель ядра, предсказывающая существование острова стабильности сверхтяжелых элементов в области  $Z = 114-120$  и  $N = 184$ . Элементы, расположенные на этом острове, были недавно синтезированы. Сегодня они замыкают седь-

мой ряд Периодической таблицы. Исходя из свойств их распада, особенно самых тяжелых — 117-го и 118-го, элементы с атомными номерами 119 и 120 тоже должны существовать. (Далее мы поговорим об этом более подробно.) Данные элементы открывают восьмой период таблицы. Ожидаемые периоды их полураспада будут составлять десятые и сотые доли миллисекунд (громоздкое время в масштабах микромира, но исключительно малое для работы с ними). Скорее всего, рано или поздно эти элементы будут синтезированы в мировых лабораториях: в Дубне, Токио, в Кане (Франция), Дармштадте (Германия)... По сравнению с 118-м элементом их выход уменьшится, мы меняем пучок ионов кальция-48 ( $^{48}\text{Ca}$ ) на пучок ионов титана-50 ( $^{50}\text{Ti}$ ). Словом, работа с ними займет много времени.

В атомных (химических) свойствах сверхтяжелых элементов тоже сюрпризы.

С увеличением атомного номера элемента растет электрическое поле ядра, в котором двигаются электроны. По мере приближения их скорости к скорости света, согласно теории относительности, растет релятивистская масса электрона. Это в первую очередь относится к электронам на внутренних орбитах, ближайших к ядру, движущихся с максимальной скоростью. Релятивистский эффект приводит к сжатию внутренних орбит (релятивистское сжатие). Эффект должен быть учтен в расчете структуры сверхтяжелого атома, что не было сделано в упомянутых выше нерелятивистских расчетах.

Не менее важны и последствия сжатия внутренних орбит, такие как экранирование поля ядра, электронные корреляции на внешних орбитах, а также другие поправки более высокого порядка. Благо есть строгая теория, которая позволяет повысить точность расчетов на известных атомах и по этому рецепту вести расчеты сверхтяжелых. Сейчас физики-теоретики выработали так называемый «золотой стандарт». Они могут рассчитать энергию связи последнего электрона в атоме золота (потенциал ионизации) с беспрецедентной точностью: 0.003 электронвольт, или 0.03%!

Первые наблюдения релятивистского эффекта в 12-й группе таблицы Менделеева были проведены в Дубне в 2007 г. с 3.6-секундным изотопом 112-го элемента коперниция (Cn) и его легким гомологом — ртутью (Hg). Последующие измерения для элементов 14-й группы флеровия (Fl) и свинца (Pb) показали сильный рост этого эффекта. Сейчас остается под вопросом, является ли 118-й элемент благородным газом? Думаю, что он еще продемонстрирует принадлежность к 18-й группе, хотя, возможно, и не будет газом при комнатной температуре. Вероятно также, что у 119-го элемента мы обнаружим скачок химических свойств — от характерных для 18-й группы Периодической таб-

## Периодическая таблица

1 <b>H</b> hydrogen 1.008 [1.0078, 1.0082]	2		Key:						
3 <b>Li</b> lithium 6.94 [6.938, 6.997]	4 <b>Be</b> beryllium 9.0122	atomic number <b>Symbol</b> name conventional atomic weight standard atomic weight							
11 <b>Na</b> sodium 22.990	12 <b>Mg</b> magnesium 24.305 [24.304, 24.307]	3	4	5	6	7	8	9	
19 <b>K</b> potassium 39.098	20 <b>Ca</b> calcium 40.078(4)	21 <b>Sc</b> scandium 44.956	22 <b>Ti</b> titanium 47.867	23 <b>V</b> vanadium 50.942	24 <b>Cr</b> chromium 51.996	25 <b>Mn</b> manganese 54.938	26 <b>Fe</b> iron 55.845(2)	27 <b>Co</b> cobalt 58.933	
37 <b>Rb</b> rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> strontium 87.62	39 <b>Y</b> yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> zirconium 91.224(2)	41 <b>Nb</b> niobium 92.906	42 <b>Mo</b> molybdenum 95.95	43 <b>Tc</b> technetium	44 <b>Ru</b> ruthenium 101.07(2)	45 <b>Rh</b> rhodium 102.91	
55 <b>Cs</b> caesium 132.91	56 <b>Ba</b> barium 137.33	57-71 lanthanoids	72 <b>Hf</b> hafnium 178.49(2)	73 <b>Ta</b> tantalum 180.95	74 <b>W</b> tungsten 183.84	75 <b>Re</b> rhenium 186.21	76 <b>Os</b> osmium 190.23(3)	77 <b>Ir</b> iridium 192.22	
87 <b>Fr</b> francium	88 <b>Ra</b> radium	89-103 actinoids	104 <b>Rf</b> rutherfordium	105 <b>Db</b> dubnium	106 <b>Sg</b> seaborgium	107 <b>Bh</b> bohrium	108 <b>Hs</b> hassium	109 <b>Mt</b> meitnerium	



57 <b>La</b> lanthanum 138.91	58 <b>Ce</b> cerium 140.12	59 <b>Pr</b> praseodymium 140.91	60 <b>Nd</b> neodymium 144.24	61 <b>Pm</b> promethium	62 <b>Sm</b> samarium 150.36(2)
89 <b>Ac</b> actinium	90 <b>Th</b> thorium 232.04	91 <b>Pa</b> protactinium 231.04	92 <b>U</b> uranium 238.03	93 <b>Np</b> neptunium	94 <b>Pu</b> plutonium

лицы до известных у элементов первой группы. Но определенно релятивистский эффект заметно ослабит эти изменения.

Есть основания полагать, что при дальнейшем увеличении атомного номера уже для элементов 121–123 групповые отличия почти исчезнут. По сути, исчезнет периодичность в изменении химических свойств элементов. На смену старой Периодической таблице придет новая, сильно измененная в начале восьмого периода. Выступая на торжественном открытии Международного года Периодической таблицы химических элементов 29 января 2019 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО, я говорил о том, что, по-видимому, мы в своих иссле-

дованиях уже сегодня близко подошли к границе, за которой исчезают групповые различия химических элементов.

Как увидеть это в эксперименте, когда атомы живут всего доли миллисекунд? Как получить эти атомы в минимально необходимом количестве? Наконец, можно ли отойти назад и в исследованиях химических свойств уже синтезированных сверхтяжелых элементов увидеть границы применимости периодического закона?

Вы видите, что после открытия сверхтяжелых элементов в нашу действительность, как из ящика Пандоры, выплеснулось много проблем. Некоторые из них пока просто не имеют решения.

# ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

									18
									2 <b>He</b> helium 4.0026
			13	14	15	16	17		
			5 <b>B</b> boron 10.81 [10.806, 10.821]	6 <b>C</b> carbon 12.011 [12.009, 12.012]	7 <b>N</b> nitrogen 14.007 [14.006, 14.008]	8 <b>O</b> oxygen 15.999 [15.999, 16.000]	9 <b>F</b> fluorine 18.998	10 <b>Ne</b> neon 20.180	
			13 <b>Al</b> aluminium 26.982	14 <b>Si</b> silicon 28.085 [28.084, 28.086]	15 <b>P</b> phosphorus 30.974	16 <b>S</b> sulfur 32.06 [32.059, 32.076]	17 <b>Cl</b> chlorine 35.45 [35.446, 35.457]	18 <b>Ar</b> argon 39.95 [39.792, 39.963]	
10	11	12							
28 <b>Ni</b> nickel 58.693	29 <b>Cu</b> copper 63.546(3)	30 <b>Zn</b> zinc 65.38(2)	31 <b>Ga</b> gallium 69.723	32 <b>Ge</b> germanium 72.630(8)	33 <b>As</b> arsenic 74.922	34 <b>Se</b> selenium 78.971(8)	35 <b>Br</b> bromine 79.904 [79.901, 79.907]	36 <b>Kr</b> krypton 83.798(2)	
46 <b>Pd</b> palladium 106.42	47 <b>Ag</b> silver 107.87	48 <b>Cd</b> cadmium 112.41	49 <b>In</b> indium 114.82	50 <b>Sn</b> tin 118.71	51 <b>Sb</b> antimony 121.76	52 <b>Te</b> tellurium 127.60(3)	53 <b>I</b> iodine 126.90	54 <b>Xe</b> xenon 131.29	
78 <b>Pt</b> platinum 195.08	79 <b>Au</b> gold 196.97	80 <b>Hg</b> mercury 200.59	81 <b>Tl</b> thallium 204.38 [204.38, 204.39]	82 <b>Pb</b> lead 207.2	83 <b>Bi</b> bismuth 208.98	84 <b>Po</b> polonium	85 <b>At</b> astatine	86 <b>Rn</b> radon	
110 <b>Ds</b> darmstadtium	111 <b>Rg</b> roentgenium	112 <b>Cn</b> copernicium	113 <b>Nh</b> nihonium	114 <b>Fl</b> flerovium	115 <b>Mc</b> moscovium	116 <b>Lv</b> livermorium	117 <b>Ts</b> tennessine	118 <b>Og</b> oganesson	

63 <b>Eu</b> europium 151.96	64 <b>Gd</b> gadolinium 157.25(3)	65 <b>Tb</b> terbium 158.93	66 <b>Dy</b> dysprosium 162.50	67 <b>Ho</b> holmium 164.93	68 <b>Er</b> erbium 167.26	69 <b>Tm</b> thulium 168.93	70 <b>Yb</b> ytterbium 173.05	71 <b>Lu</b> lutetium 174.97
95 <b>Am</b> americium	96 <b>Cm</b> curium	97 <b>Bk</b> berkelium	98 <b>Cf</b> californium	99 <b>Es</b> einsteinium	100 <b>Fm</b> fermium	101 <b>Md</b> mendelevium	102 <b>No</b> nobelium	103 <b>Lr</b> lawrencium

## Что это означает и к чему следует готовиться специалистам?

Для того чтобы продолжить наши рассуждения о Таблице, надо было бы сначала удостовериться, что атомы с такими большими атомными номерами вообще существуют. И конечно, убедиться в том, что столь тяжелые ядра можно синтезировать в тех или иных ядерных реакциях. Я упомянул, что в последние годы были синтезированы тяжелые элементы конца седьмого ряда таблицы Менделеева. Самое тяжелое ядро с массой 294 было получено дважды: как четно-четный изотоп 118-го элемента (содержит 118 протонов и 186 нейтронов) с периодом полураспада около

0.5 мс и нечетно-нечетный изотоп 117-го элемента (117 протонов и 187 нейтронов) с периодом полураспада в 100 раз большим. Это огромные времена в ядерных масштабах (хотя работать с ними очень трудно) — свидетельство того, что и более тяжелые ядра с массой 300 и выше также могут существовать.

## Кажется, что дело сделано...

Нет, показана лишь выполнимость необходимого первого условия. Теперь надо эти ядра получить в эксперименте. И тут мы быстро пришли к заключению, что наши средства, которые сыграли решающую роль в синтезе сверхтяжелых эле-



Ускоритель ДЦ-280 — базовая установка Фабрики сверхтяжелых элементов.

ментов (многие из них были лучшими в мировой практике) совершенно непригодны, чтобы двигаться вперед. На новом этапе исследований необходимо существенно поднять чувствительность эксперимента, улучшить аппаратуру, иметь значительно более мощные ускорители, более совершенные методики, освоить новые технологии. Нужно как бы уйти из прошлого и перейти в здание будущего. И совершить переход по возможности быстро. Мы пошли этим путем.

С 2012 г. Объединенный институт ядерных исследований в Дубне начал строить новый ускорительный комплекс, по существу новую лабораторию — Фабрику сверхтяжелых элементов. Мы поставили задачу увеличить чувствительность опытов в десятки, а со временем, быть может, в 100 раз. Принять такое решение было нелегко, слишком много нового нужно было делать одновременно, но другого выхода не было.

Прошло семь лет, и 26 декабря 2018 г. в 10 утра новый ускоритель (циклотрон ДЦ-280) в соответствии с графиком сооружения этой установки дал первый пучок ускоренных тяжелых ионов. Для наших конструкторов, инженеров и техников это большой этап проделанной работы, свидетельствующий о том, что все узлы нового изделия работают, как задумано. У руководства института тоже

есть чувство завершенности: все вложенные средства правильно и быстро реализованы.

Для научных же работников это «первый звонок», надо форсировать подготовку к демонстрационным экспериментам. Мы должны почувствовать, что идеи, лежащие в основе созданного нами научно-экспериментального комплекса, состоятельны, что параметры установок соответствуют нашим ожиданиям. Эти эксперименты для нас будут экзаменом. Я бы не стал серьезно обсуждать и тем более расписывать наше будущее, пока мы не сдадим экзамен.

**Можно задать Вам наивный вопрос: зачем нужно дальше заполнять Периодическую таблицу Менделеева? Какое значение для науки имеет эта работа?**

В конечном счете мы проверяем и тем самым изучаем закон природы, открытый Д.И.Менделеевым 150 лет назад. Заполнять Периодическую таблицу очень важно, потому что мы уже чувствуем, что подошли близко к моменту, когда этот закон начинает меняться, причем меняться быстро. И, несмотря на то что продвижение к все более тяжелым элементам требует огромных усилий, познание любых изменений законов природы — например, периодичности свойств химических элемен-

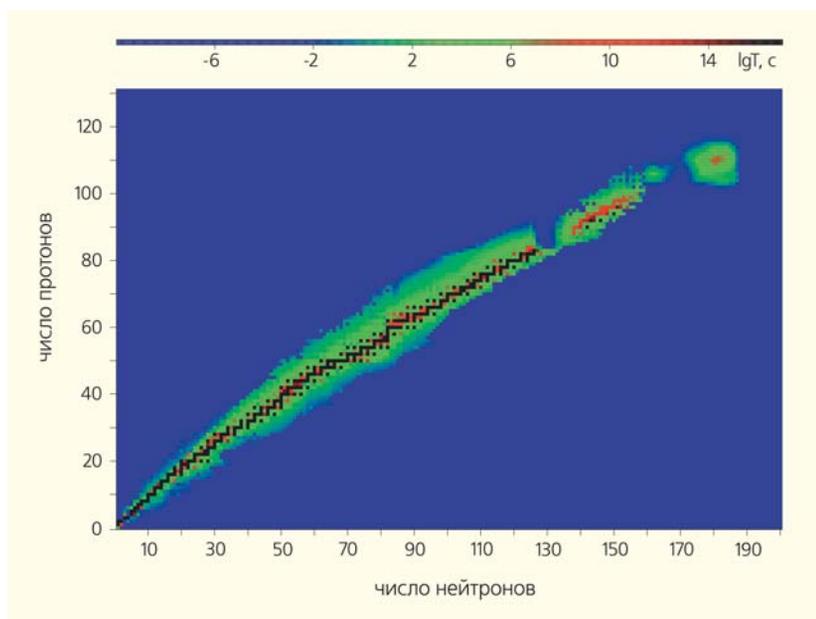
тов — носит фундаментальный характер. Как уже говорилось, с ростом атомного номера элемента релятивистский эффект быстро растёт. Еще быстрее меняется электронная структура сверхтяжелого атома и энергия связи его последнего электрона, ответственного за химические свойства элемента. Мы же должны исследовать этот эффект экспериментально. А для того чтобы добраться до этих атомов, надо, как говорится, еще пуд соли съесть. Надо получать в десятки и сотни раз больше атомов, чем мы имели в последние годы. Время существования тяжеловесов в лучшем случае — доли секунды. Как определить химические свойства этих атомов за доли секунды? Да, химические реакции идут значительно быстрее, но нужно придумать, как управляться в эти мгновения. Пока не знаем, но будем, определенно, этим заниматься.

### Ученые, работающие в вашем исследовательском коллективе — выпускники российских вузов?

Конечно, большинство наших сотрудников пришли в институт после окончания вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Воронежа, Саратова, Твери, Томска, Дальнего Востока. Но мы, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), — международный научный центр 18 стран-участниц. Среди них многие бывшие республики Советского Союза, страны Восточной Европы, Азии (Монголия, Вьетнам), Куба. У института широкое научное сотрудничество и с исследователями Швейцарии, Германии, Италии, Франции, Израиля, США и др. С американскими учеными мы взаимодействуем наиболее плотно уже более 25 лет. Они готовят для наших совместных экспериментов мишенный материал на ядерном реакторе в Национальной лаборатории Ок-Риджа.

### Почему так трудно произвести элементы, живущие от микросекунды до нескольких секунд, и идентифицировать их химические свойства? Были ли на протяжении Вашей работы кризисные моменты, когда казалось, что исследования зашли в тупик?

Потому что образование сверхтяжелого элемента — процесс исключительно редкий, и мы работаем на грани возможностей. Мне кажется, что так было всегда. Все переживания и трудности в ходе работы были связаны часто с тем, что не хватало

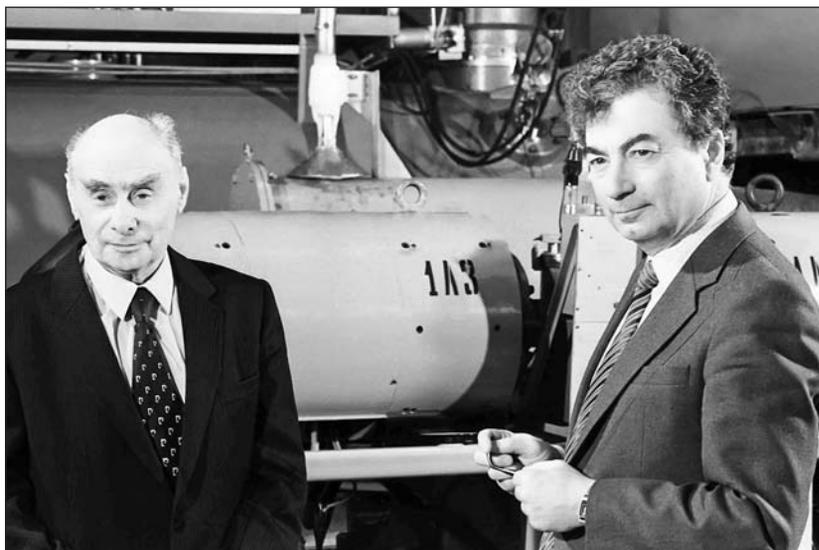


Карта изотопов с островом стабильности в правом верхнем углу.

терпения. Представьте: на протяжении 12 лет практически непрерывно идет эксперимент. Люди трудятся круглосуточно — посменно, без праздников, суббот и воскресений. Меняется их образ жизни. И в этом режиме, когда, казалось бы, мы должны уже зарегистрировать столь долгожданное событие, его все нет, и непонятна причина. Естественно, закрадываются сомнения: может быть, где-то ошиблись, что-то не доглядели, заранее не проверили. А потом вдруг за неделю сразу два события... В нашей работе это называют статистикой, которую Георгий Николаевич Флёрв\* справедливо называл «садикой».

В связи с этими эмоциями я вспомнил, что в 2017 г. был приглашен в Копенгаген на VIII Международную конференцию по ускорителям, ее организаторы решили включить в программу три научных доклада, не связанных непосредственно с тематикой конференции. Меня просили рассказать об открытии сверхтяжелых элементов. А профессор Иоахим Мних, директор по исследованиям Научно-исследовательского центра «Deutsches Elektronen-Synchrotron» — DESY (Гамбург, Германия) докладывал о будущем проекте Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария). Мне было интересно слушать доклад об открытом в 2012 г. бозоне Хиггса, о котором, как говорил докладчик, мало что известно до сих пор. Из доклада следовало: чтобы исследовать этот знаменитый бозон, надо строить специальный ускорительный комплекс — Хиггс-фабри-

\* Г.Н.Флёрв (1913–1990) — советский физик-ядерщик, один из отцов-основателей Объединенного института ядерных исследований в Дубне, академик АН СССР.



Г.Н.Флёров и Ю.С.Оганесян. Конец 1980-х годов.

ку (и здесь — фабрика!), так как на Большом адронном коллайдере они рождаются весьма редко. На 10 млрд столкновений — только один бозон Хиггса. «Мне бы такое счастье», — подумал я: у нас ведь в лучшем случае получается один атом сверхтяжелого элемента на триллион столкновений — в 100 раз реже, чем бозон Хиггса! Да еще у этого нуклида надо определить 5–7 поколений его радиоактивного семейства, измерить характеристики распада ядер (энергию и периоды полураспада) в каждом поколении... Когда я сказал об этом Мниху, тот ответил, что знал о наших экспериментах, но не предполагал, что рождение элемента столь редкое явление.

### Как Вам удалось найти оригинальный метод синтеза сверхтяжелых элементов, позволивший обогнать лаборатории ядерных исследований Японии, США?

Мы действительно использовали новый подход и не делали из этого секрета. Однако и прежний метод синтеза, так называемое холодное слияние ядер, тоже родился в стенах нашей лаборатории в 1974 г. Спустя несколько лет после первых экспериментов нам стало понятно, что к получению долгоживущих сверхтяжелых элементов реакция холодного слияния не приведет, потому что во взаимодействующих ядрах не хватает нейтронов. А для того чтобы получить даже весьма скромный избыток нейтронов, нужно существенно усложнить эксперимент: использовать в качестве мишенного материала не свинец или висмут, как ранее, а нейтронно-избыточные изотопы искусственных элементов, такие как: плутоний-244 ( $^{244}\text{Pu}$ ) или кюрий-248 ( $^{248}\text{Cm}$ ). А в качестве бомбардирующего снаряда надо выбрать уникальное вещество — очень редкий и дорогой кальций-48

( $^{48}\text{Ca}$ )\* (содержит 20 протонов и 28 нейтронов): в естественной смеси изотопов кальция его в 500 раз меньше основного изотопа — кальция-40 ( $^{40}\text{Ca}$ ). Затем необходимо ускорить ионы  $^{48}\text{Ca}$  до скорости, равной примерно 0.1 скорости света, в расчете на редкий процесс слияния ядер —  $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ , — ведущего к образованию 114-го элемента.

На Фабрике сверхтяжелых элементов мы не планируем проводить много экспериментов; их будет несколько в год, но более длительных и емких, чем прежние. Наверное, через 15–20 лет наши нововведения вновь устареют, но при трех-четырех экспериментах в год можно будет

накопить данные, которые позволят понять структуру и свойства тяжелейших элементов и, конечно, существенно расширят наши знания о границах Таблицы элементов.

### Таким образом, Вы отводите 20 лет для того, чтобы разобраться с вопросами, которые сегодня поставила Периодическая таблица?

Не могу точно предсказать, но 15–20 лет не столь большой срок. Время летит быстро. Учтем также, что по ходу дела будут возникать вопросы, требующие ответов.

### Можно ли предположить, что где-то в природе (может быть, в космосе) реализуются естественные условия синтеза сверхтяжелых элементов?

Серьезная проблема, и астрофизики занимаются этим делом основательно. Могут ли сверхтяжелые элементы образоваться в природном синтезе (нуклеосинтезе) подобно всем тяжелым элементам, вплоть до урана? Тот факт, что в космических лучах не обнаружены ядра тяжелее урана, теоретически объясним более коротким временем их жизни по сравнению со временем полета от источника к детектору. С другой стороны, всегда остается вопрос: способен ли нуклеосинтез во вспышке сверхновой дотянуться до столь тяжелых ядер? А если да, то смогут ли эти элементы выжить в процессе последовательных бета-распадов и лечь на линию бета-стабильности? Я не хочу вводить читателя в частные проблемы, достаточно почувствовать, что процесс определяется многими условиями. Хотел бы только обратить внимание

\* Кальций-48 ( $^{48}\text{Ca}$ ) — самый тяжелый изотоп кальция, испытывает двойной бета-распад с периодом полураспада  $(4.39 \pm 0.58) 10^{26}$  лет.

на то, что искусственный синтез элементов далек от того, как он происходит в природе. Мы в лаборатории не в состоянии создать условия вспышки сверхновой, с большими плотностями потока нейтронов, сверхвысокими температурами, с вовлечением огромного количества вещества. Поэтому сталкиваем уже приготовленные природой или наработанные в ядерном реакторе долгоживущие нуклиды, преследуя цель уловить редкий процесс слияния ядер с образованием составного ядра суммарной массы, его быстрое охлаждение не без потерь (выживание) и затем наблюдать его самопроизвольный распад.

Результаты, более-менее близкие к природному синтезу, реализуются в малом объеме подземного ядерного взрыва, когда исходным веществом для последующего синтеза более тяжелых элементов служит уран или плутоний. За очень короткий промежуток времени, менее 1 мкс, в цепной реакции возникает поток нейтронов высокой плотности, в котором исходные ядра могут захватить до 20 нейтронов. В последующих после взрыва бета-распадах образуются трансурановые элементы вплоть до 100-го элемента — фермия. Так были впервые синтезированы элементы с  $Z = 99$  и  $Z = 100$ . Но для синтеза более тяжелых элементов этих условий явно недостаточно. Напомним, что при вспышке сверхновой синтез длится секунды и в процесс вовлечены массы вещества, превышающие массу Солнца.

**Некоторые ученые допускают, что при столкновении черных дыр могут извергаться короткоживущие ядра, которые при распаде образовали бы ядра тяжелее железа. Согласны ли Вы с этим предположением?**

Когда астрофизики говорят о взаимодействии черных дыр или нейтронных звезд, они рассматривают также взрывные процессы нуклеосинтеза, как при вспышке сверхновой. В момент соприкосновения двух нейтронных звезд эти гигантские объекты теряют устойчивость, в результате чего в космическое пространство выплескивается огромное количество вещества, исчисляемое в тысячах сверхно-



Ю.Ц.Оганесян на пресс-конференции, посвященной присвоению названий новым элементам Периодической системы элементов Д.И.Менделеева, в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н.Флёрва. 12 декабря 2016 г.

вых! Теперь даже принято исчислять подобные катаклизмы в «килоновых». Естественно, при увеличении мощности взрыва на три порядка нуклеосинтез может пройти дальше, к более тяжелым ядрам. Но какие-то иные пути нуклеосинтеза, присущие столкновению нейтронных звезд и отличные от взрыва сверхновых, пока серьезно не рассматриваются. Хотя, конечно, нельзя исключить, что подобные особенности могут стать видны при более глубоком рассмотрении этих сложных процессов.

**Как бы Вы ответили: какую роль Периодическая таблица играет в Вашей научной работе?**

Я пришел к этой задаче из своих занятий ядерной физикой. Теперь столкнулся с проблемой электронной структуры тяжелейших атомов. Красивая наука — атомная физика, демонстрирующая удивительную гармонию. Она очень притягательна и интересна. Жалею, что не занялся этой наукой немного раньше.

Интервью подготовила  
**Е.В.Сидорова**

## “We Have Come Close to the Limits of Applicability of the Periodic Law”

Interview with Y.T.Oganessian  
Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia)

On the eve of the Grand opening of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements academician Y.T.Oganessian told the editor of the “Priroda” journal about the findings in the study of properties of superheavy elements, and on his vision of the future work of the Factory of superheavy elements.

**Keywords:** Periodic Law, Periodic Table of Elements, superheavy elements, artificial synthesis of elements, relativistic effect.

# Созидание «лестницы» химического образования

Интервью с академиком РАН В.В.Луниным

Химический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Одна из целей Международного года Периодической таблицы химических элементов заключается «в развитии образования в области фундаментальных наук», что созвучно чаяниям Д.И.Менделеева: на рубеже 19-го и 20-го столетий он подробно изложил, как нужно «мести лестницу образования». О некоторых современных особенностях этой сложной, непрерывной, многоступенчатой работы редактору «Природы» рассказал президент химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, академик В.В.Лунин.

**Валерий Васильевич, очевидно, провозглашение Организацией объединенных наций Международного года Периодической таблицы химических элементов в 2019 г. — не только дань уважения первооткрывателю периодического закона и высокая оценка заслуг современного естественнонаучного сообщества, но и поиск объединяющего начала, позволяющего всем миром преодолевать некие проблемы, связанные с развитием химии?**

Должен сказать, что сегодня и в странах Европы, и на Американском континенте химия, к сожалению, не очень привлекает молодых людей, поступающих в вузы. Это в значительной степени следствие хемофобии, существующей в обществе. Между тем для развития перспективных научных направлений в нашу сферу должны приходить молодые специалисты, и решение задачи мы с коллегами видим прежде всего в развитии системы образования.

Выбор темы Международного года ООН, разумеется, не случаен. Мы хотели бы напомнить людям о фундаментальном законе природы, познание которого изменило мир. В 2016 г. Международный союз теоретической и прикладной химии утвердил официальные названия трех новых сверхтяжелых элементов — московий, теннессин, оганесон, — полученных в лаборатории ядерных исследований имени Г.Н.Флёрва Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне, и в ознаменование столь важного события в марте 2017 г. в Москве в Центральном доме ученых РАН состоялась торжественная церемония с участием исследователей из России, США, Великобритании, Японии. Тогда впервые была озвучена идея посвятить



В.В.Лунин.

2019 год периодическому закону химических элементов. Затем предложение Российского химического общества имени Д.И.Менделеева поддержали 79 крупнейших химических научных обществ разных стран.

Названия новых химических элементов свидетельствуют о большом уважении мирового научного сообщества к достижениям российской химической науки: 115-е место в Периодической таблице занял московий (*Moscovium, Mc*), 118-м стал элемент оганесон (*Oganesson, Og*), который носит имя научного руководителя лаборатории ядерных исследований академика Юрия Цолаковича Оганесяна\*. Напомню, что в Периодической таблице

\* Международный союз теоретической и прикладной химии рекомендовал назвать 118-й элемент в честь академика Ю.Ц.Оганесяна за новаторский вклад ученого в исследование сверхтяжелых элементов.

химических элементов научный вклад России олицетворяют также названный в честь нашей страны — рутений (*Ruthenium, Ru*) с атомным номером 44, менделевий (*Mendelevium, Md*) с атомным номером 101 и 105-й элемент дубний (*Dubnium*) — его название напоминает о городе физиков Дубне. В этом ряду естественный элемент лишь один — рутений, описанный в 1844 г. профессором химии и ботаники Казанского университета Карлом Карловичем Клаусом, остальные элементы получены посредством ядерного синтеза.

Язык химии интернационален. Ежегодно в мире синтезируют порядка тысячи новых химических соединений, название каждого из них (так же, как и имена новых химических элементов) согласовывается с Международным союзом теоретической и прикладной химии (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC). Так поддерживается единство химического сообщества. В 2019 г. Московский университет и издательство «Энциклопедия» выпустили учебное пособие «Энциклопедический словарь. Химические элементы»\*, в котором приведены исчерпывающие сведения обо всех элементах Периодической таблицы с 1-го по 118-й номер. Я надеюсь, что эта книга будет переведена на английский язык к XXI Менделеевскому съезду по общей и прикладной химии, который состоится в сентябре 2019 г. в Санкт-Петербурге.

### **Какие шаги, по Вашему мнению, нужно предпринимать сегодня в сфере отечественного химического образования для того, чтобы талантливые молодые люди могли найти себя в науке?**

В нашей стране в общеобразовательной программе средней школы ученики 10–11-го классов изучают химию один час в неделю — неудивительно, что у школьников нет мотивации к освоению этого предмета. И только благодаря энтузиазму отдельных учителей появляются дети, которые хотят заниматься химией. Мы находим их, в частности, благодаря школьным олимпиадам всех уровней. Московский университет обязательно курирует проведение заключительных туров Всероссийской олимпиады школьников. Ее призеры, поступая на химический факультет, успешно проходят дополнительные испытания и становятся нашими студентами. В 2018 г. на химфак поступили 71 победитель и 100 призеров олимпиад высокого уровня — это более половины первого курса.

В конце 2018 г. я представил министру науки данные об успехах школьников на Всемирной олимпиаде по химии за последние 10 лет: из 40

российских участников 27 стали золотыми призерами, 12 — серебряными и один — бронзовым. Российская делегация всегда в пятерке лучших команд мира по химии среди представителей 79 государств; принимают же участие в олимпиаде порядка 320–330 человек. Министр науки и высшего образования и министр просвещения должны понимать, что это многолетнее лидерство не случайно, за победами ребят — большая работа тех, кто растит юных химиков. И конечно, школьным педагогам и университетским преподавателям, со своей стороны, хотелось бы видеть в профильных министерствах людей компетентных, что на протяжении последних лет получалось, увы, не всегда. Например, несколько лет назад один из министров образования и науки РФ, произнося речь в МГУ, пожаловался, что зря учил химию: это ему совершенно в жизни не пригодилось, «лучше бы выучил второй язык».

В 2016 г. отражением полного непонимания сути естественнонаучного образования стала идея Министерства образования и науки РФ отказаться от предметного обучения в школе: предполагалось ввести предмет «естествознание», который заменил бы собой физику, химию, биологию. Экспертам, приглашенным к участию в разработке новой концепции обучения, пришлось приложить титанические усилия для того, чтобы объяснить министерским чиновникам: не может быть учителя, который сумел бы читать сразу три предмета. От абсурдной идеи отказались, хотелось бы надеяться, что возврата к этому не будет.

Очень важно правильно оценивать значение олимпиадного движения: ведь это не просто соревнование. 21–28 апреля 2019 г. в 53-й раз состоится Международная Менделеевская олимпиада школьников по химии — единственная из числа всесоюзных олимпиад, сохраненная нами после распада Советского Союза. Все национальные химические общества стран СНГ подписали обращение к правительствам своих государств и получили их согласие на объявление Менделеевской олимпиады Международной олимпиадой стран СНГ и Балтии. Отвечая на Ваш вопрос о том, как идти навстречу талантливым молодым людям, подчеркну: настоящее стремление к научным знаниям не знает границ, поэтому некогда единое образовательное пространство должно сохраниться. И нам удалось даже расширить его.

До 1998 г. Менделеевская олимпиада школьников по химии проводилась только в России (в г.Пушино и в Москве). В 1997 г. я предложил президенту Армении Л.А.Тер-Петросяну провести следующее состязание юных химиков в Ереване, и он согласился. Тогда только закончилась война между Арменией и Азербайджаном, в 1998 г. впервые после долгого перерыва включили свет в до-

\* Лунин В.В., Леенсон И.А., Дроздов А.А., Степанов Н.Ф., Бердоносов С.С. «Энциклопедический словарь. Химические элементы». М.: Энциклопедия, 2019.

мах. И все же в ереванской школе имени А.С.Пушкина собрались школьники на Менделеевскую олимпиаду. На следующий год ребята отправились в Киргизию, и олимпийскую встречу курировал президент страны Аскар Акаевич Акаев (ныне профессор механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова). А дальше Менделеевская олимпиада пошла путешествовать по всем столицам бывшего Советского Союза.

Спустя несколько лет после начала олимпиадного движения СНГ и Балтии к нему присоединились Болгария, Венгрия, Румыния, Македония, с 2012 г. в состязаниях по химии участвуют школьники из Саудовской Аравии, Турции, Кувейта, Израила. В 2015 г. в олимпиадное движение вернулась Грузия. В 2017 г. на Менделеевской олимпиаде встретились школьники из 22 стран, и в их рядах впервые были юные химики из Монголии и Хорватии.

**По существу, Менделеевская олимпиада школьников по химии служит не только целям просвещения молодых людей и объединения профессионального сообщества, де-факто она стала инструментом дипломатии, ведь такие встречи очень важны для сохранения нормальных, доверительных отношений между людьми разных стран и помогают развитию научных связей, правда?**

Конечно. В этом контексте не могу не вспомнить 50-ю Менделеевскую олимпиаду школьников, которая состоялась в 2016 г. в Москве: накануне события в наш организационный комитет обратились учителя Украины с просьбой об участии призеров национальной олимпиады страны в международном состязании юных химиков. Это было очень важно, прежде всего для детей, желавших испытать себя, оценить свой собственный уровень подготовки. Если заглядывать чуть дальше, то расширять олимпиадное движение школьников по химии необходимо и для повышения уровня нашего отечественного образования, без чего невозможно решение новых интеллектуальных задач в области естествознания. Министр образования и науки Украины отказал нам в участии украинских школьников, и тогда их родители собрали и внесли необходимые средства, благодаря чему ребята приехали с двумя профессорами Киевского университета и успешно участвовали в Международной Менделеевской олимпиаде по химии.

**В чем отличие Международной Менделеевской олимпиады школьников по химии от Международной химической олимпиады (International Chemistry Olympiad)?**

Официальные языки Менделеевской олимпиады — русский и английский. (К слову сказать,

во многих странах СНГ по мере расширения ее географии вновь открылись русскоязычные школы.) Особенность Международной (всемирной) химической олимпиады в том, что от каждой страны в этом соревновании школьников могут участвовать только четыре человека. Согласно положению о Менделеевской олимпиаде, количество участников от каждой из стран определяется пропорционально численности бывших союзных республик: так, Россия выдвигает 10 человек, Украина и Казахстан — по восемь, остальные государства-участники присылают по четыре человека (если хотят расширить свою команду, то нужно перечислить денежный взнос за дополнительных участников).

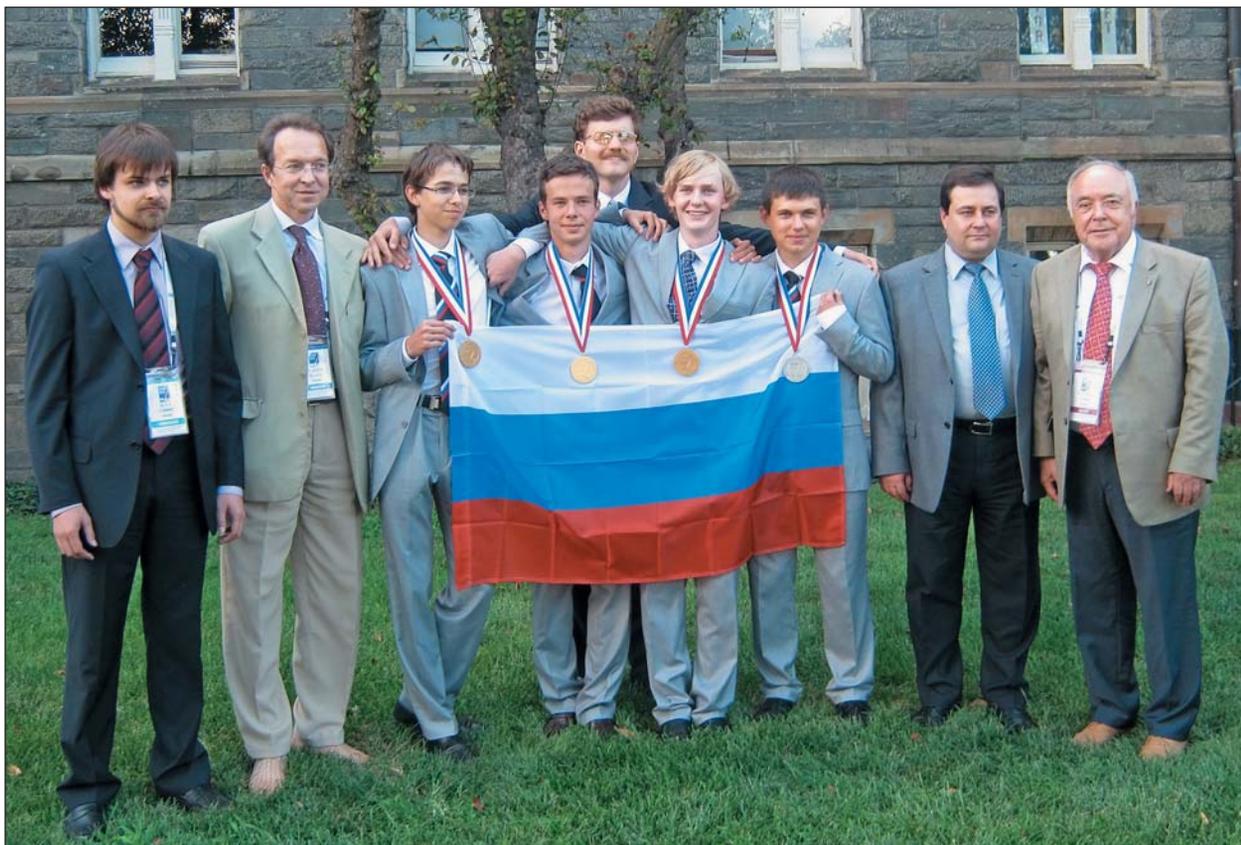
На Всемирную химическую олимпиаду приезжают свыше 300 школьников, и этот масштаб пока недостижим для Менделеевской олимпиады, так как в большинстве городов СНГ, где она проводится, технически сложно организовать экспериментальный тур для большого числа участников. В Москве это вполне возможно, и мы трижды проводили здесь Всемирную олимпиаду — в 1996, 1997, 2013 гг., а в 2015 г. она состоялась в столице Азербайджана на базе филиала МГУ имени М.В.Ломоносова в Баку.

В 2019 году оргкомитет Менделеевской олимпиады школьников по химии при финансовой поддержке благотворительного фонда Андрея Мельниченко выпускает сборник задач экспериментальных туров за последние 20 лет, прекрасно сознавая, что лабораторная работа — единственное уязвимое место российских ребят. Это неудивительно, если учесть, что в большинстве школ лабораторные кабинеты закрылись и ученикам негде формировать соответствующие навыки. Что же касается теоретических туров олимпиады, наши дети — лучшие.

**Возвращаясь к вопросу о вовлечении молодых людей в сферу фундаментальных исследований: как на химическом факультете МГУ организована специализация студентов?**

Наша принципиальная позиция состоит в том, что человеку надо дать возможность реализовать себя, и для этого дается время. Химический факультет отличается, к примеру, от физического факультета МГУ тем, что у нас нет строгого прикрепления к кафедрам, вплоть до шестого курса студент может выбирать специализацию, искать направление, в котором ему действительно будет интересно работать.

Существует пять специализированных групп, и отбор студентов в них ведется в соответствии с научными интересами молодых исследователей. Более 50 лет существует группа физикохимиков-теоретиков. Это направление предполагает боль-



Победители и призеры 44-й Международной химической олимпиады школьников со своими наставниками. Слева направо: И.О.Глебов (доцент химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова), В.В.Еремин (профессор того же факультета), Александр Олейниченко, Кирилл Петрюков, Антон Синицкий (гид команды РФ, университет Чикаго, США), Илья Устинович, Артем Бойчук, сотрудник Посольства РФ в США, академик В.В.Лунин (декан химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова). Вашингтон. 31 июля 2012 г.

шой объем математики и физики, и меньше времени отводится на практикум по химии. Есть группы живых систем — будущие биохимики, энзимологи. В группу моделирования химических процессов отбор осуществляется по критериям математической одаренности. Для Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» наш факультет готовит радиохимиков. В Центре не осталось специалистов по этому направлению. Между тем работа с изотопами элементов в любых исследованиях требует хорошего знания химии. Наконец, студенты академической группы имеют дополнительное время для исследовательской практики в институтах РАН, в которых большинство из них предполагают продолжить научную работу.

Недоученный химик опаснее, чем недоученный врач, поэтому на химическом факультете МГУ сохранена ступень специалитета: третий год мы учим студентов по программе, рассчитанной на шесть лет. Бакалавриат есть только для иностранных граждан. В итоге 25–30% выпускников химфака МГУ имеют красные дипломы и по несколько публикаций в рейтинговых журналах. Они имеют все основания защитить диплом как магистерскую диссертацию.

**Работа, связанная с получением новых элементов и идентификацией их свойств (например, на Фабрике сверхтяжелых элементов в Дубне) требует от химиков особых знаний. Вероятно, сегодня в химических вузах большее значение придается хорошей подготовке по физике?**

Директор лаборатории ядерных исследований в Дубне доктор физико-математических наук Сергей Николаевич Дмитриев — по образованию химик, выпускник Московского химико-технологического института имени Д.И.Менделеева. Но такие специалисты — редкость. Значение хорошей подготовки выпускников химических факультетов в области физики недооценивается. Химфак МГУ имени М.В.Ломоносова — единственный в нашей стране и в мире химический факультет, где при поступлении необходим сертификат ЕГЭ по физике, и место этого предмета в нашем учебном плане немногим меньше, чем химии.

На физическом факультете МГУ в течение нескольких десятилетий (до 2007 г.) химию студентам не преподавали вообще, и мне, как декану химического факультета (я работал на этом посту в 1992–2018 гг.), понадобилось около 15 лет, что-



Участники Всероссийского съезда учителей и преподавателей химии на Международной интерактивной выставке, посвященной химии и ее современным достижениям. Москва, 6 февраля 2019 г.

Фото предоставлены пресс-службой Всероссийского фестиваля науки НАУКА 0+



Сотрудники химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова представляют экспонаты интерактивной выставки, приуроченной к церемонии открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов в России.

бы убедить наших коллег-физиков в ошибочности такого решения. Это была стратегическая ошибка, невозможно достичь мировых высот в науке, не обеспечив основы фундаментального образования. К счастью, в настоящее время преподаватели химфака читают студентам-физикам курс общей и физической химии.

Мы начали беседу с того, что будущее науки и технологий связано с успешной работой молодых специалистов. В этом отношении я определенно оптимист. В Московском университете, несмотря на большие перемены в сфере образования, по-прежнему учат студентов думать. Неслучайно зарубежные коллеги и сегодня восхищаются способностью представителей российских научных школ генерировать новые идеи.

Интервью подготовила  
**Е.В.Сидорова**

## About the Ladder of Modern Chemical Education

Interview with V.V.Lunin  
Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

One of the goals of The International Year of the Periodic Table of Chemical Elements is "to develop education in the field of fundamental Sciences", which is in tune with the aspirations of D.I.Mendeleev, who described in detail how to "sweep out the ladder of education" at the turn of the 20th century. The Dean of the Faculty of Chemistry of Moscow State University, academician V.V.Lunin told the editor of "Priroda" about some modern features of this complex, continuous, and multistage work.

**Keywords:** Periodic Table of Elements, Mendeleev Annual Academic Competition for high-school students, International Chemistry Olympiad.

# Химики о Периодической таблице: профессиональный инструмент, научная икона, открытая книга?

Е.В.Антипов<sup>1,3</sup>, Е.В.Бабаев<sup>1</sup>, В.П.Зломанов<sup>1</sup>, А.В.Иванов<sup>1,2</sup>, А.А.Карякин<sup>1</sup>, А.В.Шевельков<sup>1</sup>,  
А.В.Яценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии РАН имени Н.С.Курнакова (Москва, Россия)

<sup>3</sup>Сколковский институт науки и технологий (Москва, Россия)

Десятого июля 1905 г. Дмитрий Иванович Менделеев сделал в дневнике следующую запись: «По-видимому, периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройкой и развитием обещает». Но уже при жизни автора отношение коллег к периодическому закону различалось. Одни ученые считали его фундаментальным законом природы, другие (как, например, Г.Копп, А.Кекуле, Р.Бунзен, М.Бертло, Н.Вырубов) относились к открытию Менделеева скептически. В 1876 г. вышел русский перевод составленного профессором химии и минералогии Гарвардского университета Джосайей Куком руководства по химии с многообещающим названием «Новая химия». Редактором был Александр Михайлович Бутлеров: книга Кука привлекла его широким использованием структурных представлений и формул. В отечественном издании «Новой химии» немало редакторских примечаний, но ни слова о периодическом законе, даже в предисловии Бутлерова к этой монографии.

В XX в., когда значимость периодического закона, казалось бы, уже не вызывала сомнений, изредка слышались голоса скептиков. Так, например, в 1992 г. известный американский химик, профессор Принстонского университета Лилэнд Аллен написал, что «главная икона химии» — Периодическая таблица Д.И.Менделеева — постепенно утрачивает свою роль научного инструмента и «дает все меньше указаний в решении дискуссионных вопросов теоретической неорганической химии» [1]. Спустя четверть века эта реплика американского коллеги стала точкой отсчета в разговоре с исследователями Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, которые согласились ответить на вопрос редакции «Природы», в какой мере Периодическая таблица помогает им в работе.



Памятник Д.И.Менделееву на территории Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д.И.Менделеева (Санкт-Петербург) и Периодическая таблица на стене здания института.

**Периодическую таблицу изучаешь всю жизнь**

член-корреспондент РАН Евгений Викторович Антипов,  
заведующий кафедрой электрохимии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова  
профессор Сколковского института науки и технологий

Для всего мира именно периодический закон Д.И.Менделеева — главное открытие российской науки, настолько же значительное, как закон всемирного тяготения И.Ньютона, теория относительности А.Эйнштейна. Подобных прозрений в истории науки единицы. И когда путешествуешь по разным странам и университетам, убеждаешься, что имя Менделеева известно всем и Периодическая таблица переведена на все языки (очень интересно «читать» ее, например, на китайском или на путунхуа — официальном языке Тайваня). Приезжая в Россию, зарубежные коллеги-химики стараются непременно побывать рядом с Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (Техноложкой) и сделать фотографии возле памятника великому ученому на фоне Периодической таблицы химических элементов, размещенной на стене НИИ метрологии имени Д.И.Менделеева.

На стене моего рабочего кабинета — Периодическая таблица в нестандартном исполнении: я собираю значки, символизирующие химические элементы и традиционно выпускаемые к Дню химика в МГУ. Коллекция начинается с водорода (элемент с атомным весом, равным единице, стал эмблемой самого первого студенческого праздника) и заканчивается на сегодняшний день йодом (в 2018 г. День химика состоялся в 53-й раз, что соответствует порядковому номеру этого элемента). Можно сказать, что Периодическая таблица всегда у меня перед глазами.

Вся моя работа (по крайней мере с тех пор, как я стал заниматься направленным дизайном новых неорганических структур и материалов с важными физическими свойствами) связана с использованием существующего набора химических элементов. На протяжении многих лет я постоянно изучаю Периодическую таблицу и должен сказать, что у нее есть два существенных «недостатка». Во-первых, она слишком маленькая. Создавать новые материалы — главная задача химии, и очень часто мы нуждаемся в химическом элементе, которого... нет, к сожалению.

Приведу простой пример: в начале 1993 г. мы синтезировали сверхпроводник — материал, электрическое сопротивление которого падает до нуля при довольно высокой температуре, выше 130 К (что соответствует  $-143^{\circ}\text{C}$ ) — и понимали, как надо оптимизировать его кристаллическую структуру, чтобы дополнительно повысить температуру перехода в сверхпроводящее состояние. Для создания новых сверхпроводников нужен был аналог бария — элемент с таким же зарядом, тем же типом химической связи, но обладающий ионным радиусом, меньшим, чем у бария и большим, чем у стронция. Однако такого элемента не существует в природе и, соответственно, в Периодической таблице. (В свое время мы опубликовали статью в «Природе», где описали эту проблему — необходимость модифицировать катионный состав сверхпроводника с целью «сжатия» его структуры и уменьшения расстояния между атомами меди и кислорода в медь-кислородном слое для достижения сверхпроводимости при температурах выше 140 К при нормальном давлении [2].) Мы пытались найти решение, приготавливая смесь бария и стронция и тем самым уменьшая усредненные межатомные расстояния. Но нужной оптимизации структурных параметров для медь-кислородных слоев, которые отвечают за сверхпроводимость, не достигли, потому что в одной элементарной «ячейке» находился барий, в другой — стронций, что вызывало нежелательные искажения сверхпроводящих слоев.

Второй «недостаток» Периодической таблицы состоит в том, что свойства химических элементов меняются скачкообразно, с большими различиями между соседними элементами в ее периоде. «Перехитрить» фундаментальный закон природы — сделать эти изменения

более постепенными — мы не можем. Если бы химики могли управлять химическими элементами, это очень облегчило бы нашу работу. Хорошо, что в Периодической таблице есть группа лантанидов, в пределах которой свойства химических элементов (ионный радиус, характер химической связи и др.) меняются монотонно и постепенно. Вот с помощью этой группы мы и можем заниматься структурным «тюнингом» (тонкой настройкой), создавая новые материалы.

Мне запомнились слова академика Валерия Алексеевича Легасова, в конце 1980-х читавшего лекции студентам на химическом факультете МГУ: «У хи-



Е.В.Антипов.

мика есть Периодическая система и баночки с элементами; для выполнения задачи — получения необходимых материалов — вы должны выбрать нужные баночки, смешать элементы в необходимой пропорции, найти условия, при которых могут быть синтезированы искомые вещества». По-существу, Периодическая система — «защита» в нашем восприятии химических явлений. И наоборот, заглядывая в таблицу, химик мысленно считывает заложенную в ней информацию: как именно в первом ряду переходных металлов могут меняться степени окисления элементов, координационные числа катионов в различных степенях окисления, характер связей в разных типах соединений, какими будут свойства последних... Элементарный пример — физические свойства простых оксидов двухвалентных переходных металлов со структурой хлористого натрия (от TiO до NiO), которые в пределах ряда меняются очень сильно: от металлической проводимости до изоляторов, от отсутствия каких-либо значимых магнитных кооперативных явлений до антиферромагнетизма\* при высоких температурах. И невозможно объяснить генезис подобного изменения свойств, не зная Периодической таблицы.

Когда в 1990-е годы мы синтезировали ртуть-содержащие сверхпроводники и выступали на конференциях, рассказывая о проблемах модификации структуры этих материалов, слушавшие доклад физики (они, наверное, не очень хорошо знали периодический закон) советовали: возьмите вместо ртути другие элементы и получите сверхпроводник с более совершенными качествами. На что приходилось отвечать: к сожалению, в природе существует только один химический элемент, который может иметь степень окисления плюс два и гантельную координацию в оксидных фазах. И эти особенности ртути — необходимые условия для существования подобных сверхпроводников.

Когда специалисты создают не существовавшее прежде химическое соединение, обойтись без Периодической системы невозможно. Сейчас наш научный коллектив разрабатывает материалы для аккумуляторов [3], и мы постоянно ищем возмож-



Значки, символизирующие химические элементы, выпускаются к Дню химика в МГУ имени М.В.Ломоносова.

ность улучшить их характеристики. Поясню: проводятся исследования кристаллической структуры электродного материала, в которой изменяется концентрация щелочного металла, и, одновременно, степень окисления переходного металла, переводимого при разряде аккумулятора в восстановленную форму, а при его заряде — в окисленную. Наша цель — ускорить процесс: условно говоря, аккумулятор должен заряжаться в течение нескольких часов, желательно даже минут, а не лет. Что для этого важно? Возможность быстрого перемещения ионов щелочных металлов в твердом теле. Выбранные химические элементы (переходные металлы и другие) должны обеспечивать оптимальную кристаллическую структуру и размер каналов, по которым переносящие заряд ионы лития (в литий-ионном аккумуляторе) либо калия (в калий-ионном) перемещались бы без особых затруднений.

И каждый раз, когда в нашей работе требуется изменить электрохимический потенциал катодного материала, мы начинаем размышлять: какой элемент из Периодической таблицы выбрать для модификации кристаллической структуры? Преобразование должно сопровождаться изменением длины и характера связи атомов кислорода и переходного металла, что приведет к изменению потенциала, при котором происходит извлечение лития или его внедрение в кристаллическую решетку. Последнее определит важнейшую характеристику аккумулятора — количество энергии, которое он сможет запастись.

Цепь названных условий закономерно связана с положением выбранного химического элемента в Периодической таблице. В зависимости от этого меняется электроотрицательность и характер связи с кислородом, что отражается на величине по-

\* Антиферромагнетизм — одно из магнитных состояний вещества, отличающееся тем, что магнитные моменты соседних частиц этого вещества ориентированы навстречу друг другу (антипараллельно), и поэтому намагниченность тела в целом очень мала.

тенциала, при котором происходит окисление переходного металла. Например, в кристаллической структуре  $\text{LiFeVO}_3$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  окисляется при потенциале 2.9 В относительно лития, а после замены боратного аниона на фосфатный этот процесс происходит при потенциале 3.4 В, последующая модификация с заменой фосфатного аниона на сульфат-ион и фторид-ион — при потенциале 3.9 В. Разница составляет 1 В, что позволяет посчитать, какой запас дополнительной энергии мы получим в новом аккумуляторе.

Говоря о роли Периодической таблицы в нашей работе, рискну провести аналогию с романом Л.Н.Толстого «Война и мир». В школе его заставляют читать в обязательном порядке. В итоге формально все знают содержание этого романа. Но, читая эту книгу в зрелые годы, заново открываешь ее для себя. Так и к Периодической системе надо обращаться на этапе, когда ты уже стал химиком, многое знаешь и понимаешь основные вещи в профессии. Вот тогда Периодическая таблица становится инструментом в научной работе. Конечно, студентом я не понимал этого в полной мере и, наверное, отвечал бы на вопрос о роли Периодической таблицы иначе.

Если деятельность специалиста-химика остается в рамках трех-четырех элементов, то, может быть, ему и не так нужна Периодическая таблица. Но в нашей лаборатории ведется работа по меньшей мере с 50–60 химическими элементами. Мы решаем разные задачи, создаем сверхпроводники, магнитные материалы, вещества с высокой ионной проводимостью и должны правильно прогнозировать результаты своих решений. Пожалуй, иллюстрируя роль Периодической таблицы, стоит вспомнить следующий эпизод. Когда в 1986 году открыли высокотемпературную сверхпроводимость, пошел вал работ по этой теме, прямо цунами. Многие исследователи занялись этой проблематикой. И в беседе с одним из коллег я услышал: «мы синтезируем сверхпроводник, в котором часть бария заменяем на бериллий». На вопрос, на основании чего предполагается улучшение качеств сверхпроводника при такой модификации, последовал обескураживающий ответ: «бериллий тоже принадлежит ко второй группе химических элементов». Конечно же, тут проявилось плохое знание периодического закона. Периодическая таблица помогает увидеть бесперспективность подобного выбора: бериллий хотя и относится ко второй группе, но имеет иные, чем барий, характеристики — тип химической связи, координационное число, межатомные расстояния.

Давайте расширим рамки разговора о значении Периодической таблицы как научного инструмента химиков и вспомним, что часто именно отсутствие новых веществ тормозит прогресс

в других сферах науки и техники. Конструктор ракетных двигателей не может реализовать серьезные проекты без материалов с принципиально новыми качествами. Нужны уникальные материалы для создания квантового компьютера, для получения новых лекарственных препаратов. Востребованность синтеза новых соединений огромна в самых разных областях, и даже решение большинства экологических проблем, с которыми связана существующая в обществе хемофобия, будет зависеть от наших профессиональных успехов. Например, если загрязнение воздуха в Пекине (где ТЭЦ работают на угле) можно снизить, изменив технологию производства тепла и энергии, то задача химиков — обеспечить инновации соответствующими материалами либо найти способ выработки энергии, не наносящий подобный урон окружающей среде и здоровью людей.

Один из экологически ориентированных проектов нашего исследовательского коллектива реализуется совместно с компанией «Русал» — одним из крупнейших в мире производителей алюминия. Задача — создать промышленный электролизер нового поколения, позволяющий получать алюминий без выделения в окружающую среду углекислого газа, фторсодержащих соединений и других загрязняющих воздух веществ. Когда мы стали выбирать возможные комбинации химических элементов для формирования материала анода, то в первую очередь смотрели в Периодическую таблицу. Затем анализировали, как эти элементы будут вести себя в агрессивной среде фторсодержащих расплавов при температуре 900°C и выше, в условиях очень высоких анодных потенциалов, при которых выделяется кислород. Нас интересовало, какие типы кристаллических структур сформируют эти элементы, будут ли защищены материалы анода.

Прежде чем новый тип электролизера установили на заводе, необходимо было провести общественные слушания и убедить жителей города в экологической безопасности нашего проекта. Я выступал и в очень популярной форме объяснял, что наша задача — снизить выбросы загрязняющих веществ. В настоящее время разработанный при нашем участии экспериментальный электролизер работает на Красноярском алюминиевом заводе: на его катоде выделяется алюминий, а на аноде — только кислород.

Продолжая тему хемофобии, обусловленной экологическими проблемами, отмечу: надо уходить от бензиновых, дизельных двигателей, переходить на электромобили. Еще пять лет назад электромобили считались далекой перспективой, а сейчас их производство растет по экспоненте, расширяется рынок сбыта. Лидер — Китай. Надо хорошо понимать, что свыше 50% вредных выбросов в городской воздух приходится на транс-

порт. И, не решив проблему, города продолжают вкладывать огромные деньги в лечение населения, страдающего от загрязнения атмосферы. Кстати, мэрия Москвы активно занимается вопросом перехода на аккумуляторный транспорт.

Задача химии — создавать экологически безопасное производство. Считаю, что наша работа по получению материалов для аккумуляторов — вклад в сохранение чистоты атмосферы, здоровья людей.

Периодический закон Д.И.Менделеева дает базис, на котором возникает что-то новое, и заставляет химиков продолжать трудный поиск новых материалов с использованием подходящих элементов в нашей маленькой Периодической таблице: к сожалению, создать не существующий в природе химический элемент — например, аналог бора с формальным зарядом +4 и координационным числом, равным пяти, невозможно, как бы нам ни хотелось. А вот получать новые необычные вещества с использованием ограниченного набора элементов из Периодической таблицы вопреки законам термодинамики, используя различные нетривиальные методы синтеза — сейчас главный тренд в химии. И это делается очень успешно.

### Реликвия, предназначенная не для поклонения, а для управления природными процессами

доктор химических наук Владимир Павлович Зломанов,  
профессор кафедры неорганической химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Задам встречный вопрос: «Что такое наша жизнь?». Один из возможных ответов — общение с помощью разных знаков и символов. Семь нот позволяют музыкантам создавать удивительные мелодии и симфонии. Поэты и прозаики записывают свои произведения, пользуясь алфавитом родного языка. Химики, естествоиспытатели общаются на языке символов химических элементов, собранных в «алфавит» Периодической таблицы. Есть нечто, объединяющее разные миры и понятное каждому.

Теперь от разговора о форме общения перейдем к сути. Химия — наука о веществах и их превращениях. Работая с любым химическим веществом, специалист понимает, что оно состоит из взаимодействующих частиц. Он должен знать их состав, вид,

учитывать размер, оценивать энергию их взаимодействия, обусловленную электростатическими или топологическими (как в молекуле органических циклических соединений ротаксанов или катенанов) связями, представлять структуру вещества. (Кстати, за методику синтеза катенанов французскому химику Жану-Пьеру Саважу была присуждена Нобелевская премия 2016 г.\*) Химический элемент составляет суть характеристики состава вещества, это и есть главное зерно всех наших исследований. А вся информация о каждом из химических элементов сведена в Периодической таблице.

Средневековые алхимики искали способ превратить кварцевый песок в алмаз, что означало бы «перерождение вещества» — переход диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в углерод (C). Разумеется, первая мысль современного человека такова: эта задача — из числа невыполнимых. Однако недавно и она решена. Вначале кварцевый песок превращают в кремний путем восстановления диоксида кремния коксом в дуговых электрических печах. Затем полученные пластины кремния при высокой температуре ( $1250\text{--}1300^\circ\text{C}$ ) обрабатывают окисью углерода, и получают тончайшие — не более нескольких сотен нанометров — бездефектные пленки карбида кремния ( $\text{SiC}$ ). Этот материал по структуре и всем физическим свойствам уже подобен алмазу, он нашел применение во многих областях — в частности, при изготовлении вычислительных машин, светодиодов. Для того чтобы довершить его превращение в алмаз, остается убрать из кристаллической решетки кремний. На карбид кремния воздействуют фтором при высокой температуре, результатом взаимодействия становятся газообразный тетрафторид кремния ( $\text{SiF}_4$ ) и алмаз.

Технология, о которой я в двух словах рассказал, уникальна (нигде в мире ничего подобного не существует), и разработана она в лаборатории структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Института проблем машиноведения РАН доктором физико-математических наук Сергеем Арсеньевичем Кукушкиным и кандидатом технических наук Александром Сергеевичем Осиповым [4, 5]. Эти ученые занимаются данной проблематикой и ведут эксперименты около 10 лет.

Таким образом, умело пользуясь «алфавитом» Периодической таблицы, химики управляют



В.П.Зломанов.

\* Вацадзе С.З. Лауреаты Нобелевской премии 2016 года по химии // Природа. 2017. №1. С.71–76.

процессами. На «научную икону» нужно уметь смотреть и видеть. И тогда мы можем не ограничиваться словами о важности Периодической системы, а предъявлять реальные дела.

## Периодическая таблица — очень полезный инструмент

доктор химических наук Андрей Владимирович Шевельков,  
заведующий кафедрой неорганической химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Справедлива ли проведенная Л.Алленом аналогия Периодической таблицы с «научной иконой»? В определенном смысле — в том, что химики постоянно используют ее как инструмент. На стене моего кабинета висит большая юбилейная таблица, которую к 100-летию открытия Д.И.Менделеева изготовили для академика В.И.Спицына\*, заведовавшего кафедрой неорганической химии химического факультета МГУ в 1942–1988 г. Его преемники — академик Ю.Д.Третьяков и я — многое изменили здесь за годы работы, но эта реликвия сохранена, и время от времени я обращаюсь к ней при решении исследовательских задач, хотя современный вариант Периодической таблицы, утвержденный Международным союзом теоретической и прикладной химии и известный как длиннопериодный, значительно от нее отличается. В настоящее время мы читаем студентам лекции и ведем исследования по расширенной версии, в которой последовательно представлены элементы *s*-, *d*-, *p*-блоков\*\*.

Необходимым профессиональным инструментом Периодическая таблица становится прежде всего для химиков-неоргаников, занимающихся фундаментальными исследованиями. На нашей кафедре такие темы составляют две трети всех выполняемых работ.

До открытия в 1913 г. закона Г.Мозли\*\*\* (благодаря которому стало понятно, что периодичность свойств элементов связана не столько с атомными массами, сколько с электронным строением

атома) химики, проводя эксперименты и синтезируя новые соединения, оценивали простые соотношения: определяли, какими могут быть высшие степени окисления элементов и как должны измениться радиусы их атомов, тот или иной физический параметр — например, «температура кипения высшего галогенида» (как любил указывать сам Менделеев). Но прошло время, и ситуация существенно изменилась.

В неорганической химии возникли интересные объекты, которые не могли быть описаны простыми соотношениями элементов, следовательно, для их описания требуется привлечение электронной структуры и новые подходы к анализу химической связи. Такие объекты можно разделить на две большие категории: наноразмерные вещества, для которых свойство поверхности значит больше, чем объемное свойство, и интерметаллиды — химические соединения двух и более металлов, для которых не действуют законы кратных соотношений. Например, специалистам понятно, почему сульфат калия можно описать формулой  $K_2SO_4$ : потому что тут есть простое ионно-ковалентное распределение связей. А вот для веществ группы интерметаллидов до сих пор не существует серьезной теории, описывающей химическую связь. В последние 10 лет развиваются качественные и полуколичественные подходы, позволяющие прибли-



Хроматографическая колонка. Работа с аналитическим оборудованием высокого уровня — неотъемлемая часть деятельности современных химиков-исследователей.

\* Виктор Иванович Спицын (1902–1988) — один из основоположников научной школы в области химии и технологии молибдена, вольфрама, тантала и бериллия. В 1983 г. награжден золотой медалью имени Д.И.Менделеева за цикл работ «Создание физико-химических основ и разработка методов получения высокочистых веществ».

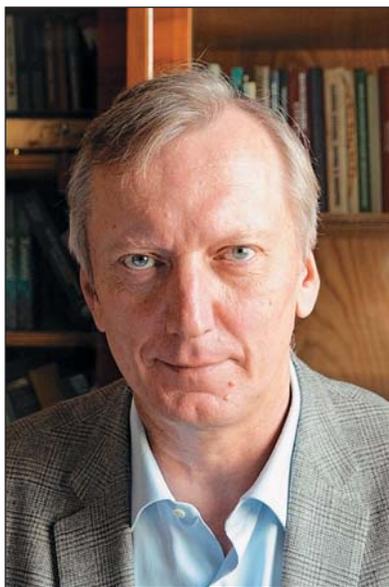
\*\* Блок Периодической таблицы — совокупность химических элементов со сходным расположением валентных электронов в атоме, т.е. их валентные электроны с наивысшей энергией занимают орбиталь одного типа (*s*-, *d*- или *p*-).

\*\*\* Закон Мозли связывает частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения атома химического элемента с его порядковым номером. Экспериментально установлен английским физиком Генри Мозли в 1913 г.

зяться к созданию такой теории. Но пока очень важен интуитивный поиск, который основан на совокупном применении знаний об экспериментальных методах и о том, как меняются фундаментальные свойства элементов в таблице Менделеева — в группе, периоде, а иногда даже по диагонали. Иными словами, первичные представления помогают найти новые материалы.

Приведу простой пример. Существует метод синтеза интерметаллида из расплава металла, переходящего в жидкое состояние при относительно низкой температуре. Таков галлий (Ga): температура плавления  $30^{\circ}\text{C}$ , кипения — около  $2000^{\circ}\text{C}$  (т.е. в расплаве он нелетучий). Вместе с галлием расплавляют другие относительно легкоплавкие металлы, и с совместным расплавом при невысокой температуре реагирует какой-либо тугоплавкий металл. Элементы вступают в химическую реакцию, продукты их взаимодействия растворяются, и при кристаллизации получается новый интерметаллид. Чем руководствуется исследователь, модифицируя вещество химически и с точки зрения электронных свойств, как он ищет другой металл, способный вступить в подобную реакцию с галлием? Помогает Периодическая таблица, показывающая изменение числа электронов в ряду химических элементов: слева от галлия, который имеет атомный номер 31, располагается цинк (Zn) с атомным номером 30, справа — германий (Ge) с атомным номером 32, и в первую очередь выбор останавливается на соседях по группе. Таким образом, даже не ставя задачу глубоко понять природу взаимодействий, возникающих в продукте, экспериментаторы открывают новые вещества с оригинальными свойствами, предсказать которые заранее невозможно. При этом прогнозировать отличия тепло-, электропроводности, магнитных и других свойств полученного соединения от известных примеров вполне реально. На этой основе возникло новое направление синтеза интерметаллидов.

Интерметаллиды востребованы (или потенциально интересны технологам) как новые сверхпроводники, термоэлектрические материалы, вещества для получения магнитокалорического эффекта\*. Повторюсь: используя очень простой под-



А.В.Шевельков.

ход, основанный на изменении электронной конфигурации на валентном уровне, мы можем синтезировать новые соединения не только с заранее известными, но даже и с непредсказуемыми свойствами.

Когда Менделеев открыл периодический закон, теории химической связи не существовало, а были лишь попытки описать валентные соотношения или, скажем, некоторые принципы строения органических соединений (как, например, теория химического строения органических веществ А.М.Бутлерова). Основная идея Менделеева состояла в развитии существовавших представлений о периодичности. Он считал главным

признаком элементов их атомные массы, но, тем не менее, догадался поменять местами кобальт и никель, йод и теллур — согласно характеру изменения их свойств, а несоответствие изменению атомных масс рассматривал как аномалию.

На рубеже XIX–XX вв. возникла новая идея — о периодичности, обусловленной электронным строением атомов. В 1910–1920-х годах было достигнуто еще более глубокое понимание периодического закона, его связи с квантованием электронных уровней атомов. Благодаря работам Н.Бора, У.Уилсона и других исследователей стало ясно, почему переходные и непереходные элементы так различаются по своим свойствам. И химия координационных соединений второй половины XX в. во многом основана на представлении о том, как расщепляется электронный *d*-подуровень у переходных металлов. Соответственно, ученые исследовали, как в пределах каждого ряда Периодической таблицы убавление (добавление) электронов сказывается на свойствах химических элементов. Было установлено, что при этом изменения претерпевают даже термодинамическая и кинетическая устойчивость — т.е. инертность и лабильность химических комплексов (их способность обмениваться лигандами, или проще — реакционная способность, не связанная с термодинамическими константами).

К 1970–1980-м годам теория химического строения вещества окончательно устоялась, и в основу ее легли аспекты Периодической системы, о которых не знали ни Менделеев, ни Мозли. В неорганической химии появились идеи о существовании коллективных взаимодействий элементов, о том, что прочная связь в металлах обеспечивается отнюдь не за счет «электронного газа» (свобод-

\* Магнитокалорический эффект — варьирование температуры магнитного вещества при изменении внешнего магнитного поля, действующего на него в адиабатических условиях.

ного движения электронов), а что это особая форма ковалентного взаимодействия, реализуемая при множественном перекрывании электронных орбиталей. Следствием такого развития научной мысли стало правило Юм-Розери\*, которое определяет способность химического элемента растворяться в металле с образованием твердого раствора (например, указывает, какими факторами обусловлено содержание меди и цинка в составе латуни и в каком диапазоне может изменяться их соотношение). Данное правило основано уже на понимании того, что необязательно рассматривать один атом как нечто обособленное, дающее основу для простого парного взаимодействия: есть коллективное взаимодействие, но оно зависит от числа валентных электронов, а значит, от положения элемента в Периодической таблице.

Показательный пример эволюции научных представлений — редкоземельные элементы, открытие которых продолжалось уже после доклада Менделеева о периодическом законе. К слову, гольмий и тулий были открыты в 1879 г., а диспрозий — в 1886-м. В ряду этих *4f*-элементов — от церия (Ce) до лютеция (Lu) — меняются два параметра: радиус атома и число электронов на валентных *f*-орбиталях. А значит, варьируя характер воздействия на лантаниды мы можем экспериментально получить вещества с определенными свойствами. Во-первых, интересно изменение магнитного поведения однотипных веществ, содержащих разные редкоземельные элементы. Во-вторых, под дейст-

вием электромагнитного излучения возникает люминесценция в видимой, ультрафиолетовой или инфракрасной области спектра, в нужной нам области длин волн — также в зависимости от природы редкоземельного элемента. Пройдя весь ряд лантанидов, мы в зависимости от радиуса атома можем обнаружить изменения структурного типа или даже состава вещества, а в зависимости от природы, количества электронов на *f*-орбиталях и их расположения — изменения функциональных свойств, магнитных или люминесцентных.

Такие работы ведутся в самых разных областях, связанных, например, с синтезом ароматических карбоксилатных комплексов или с получением оксо-селеновых и оксо-теллурических производных, осложненных галогенидом. Зачем это нужно? Тут возникают очень интересные аспекты: мы ожидаем увидеть новое применение материалов — например, тонкие переключатели в спинтронике\*\*. Для решения данной задачи нужны магниты не с трехмерным характером специфического воздействия (как у обычного, железного магнита), а с упорядочением пониженной размерности — одномерным или двумерным. Даже если вырастить кристаллы таких веществ, их магнитные свойства будут проявляться только в определенном направлении, которое под действием сильного поля можно менять. Словом, речь идет о работах, ориентированных в будущее.

Что же касается люминесценции лантанидов, эти свойства используются в более «приземленных» практиках — для изготовления биологических термометров, биологических меток в медицине, поскольку соединения лантанидов нетоксичны, применяются в микродозах и могут быть «пришты-

к» к белковой основе. Так отслеживают распределение лекарственных препаратов в разных тканях организма. Люминесцентные материалы используют также при производстве металлургических светодиодов (oled — organic light emitting diode), например энергосберегающих лампочек. Задача — получить свечение определенного цвета: чисто белое, зеленое и т.д.

\*\* Спинтроника — раздел квантовой электроники, занимающийся изучением спинового токопереноса (спин-поляризованного транспорта) в твердотельных веществах. Новое направление прикладных исследований развивается на стыке физики, химии и материаловедения и сулит перерасти в новый технологический уклад, потеснив полупроводниковую микроэлектронику.

\* Уильям Юм-Розери (1899–1968) — английский металлург, внесший значительный вклад в изучение кристаллического строения металлов и сплавов.



Некоторые исследования можно проводить только в инертной атмосфере. Для таких работ химии используют специальные герметичные перчаточные боксы.

Независимо от того, предваряют ли перечисленные исследования химии лантанидов получение нового материала с неизвестными пока свойствами, нацелены ли они на решение конечной практической задачи, фундаментальная составляющая в работе с этими элементами очень велика, хотя, казалось бы, их свойства так схожи. Все равно создать новый комплекс с разными металлами — каждый раз самостоятельная задача: надо изучить стабильность координационного числа того или иного элемента по отношению к данным лигандам, а также учесть многие другие аспекты.

Синтез не производится автоматически, его методика разрабатывается под конкретную задачу на основе фундаментальных изысканий. И сколько времени будет затрачено, заранее неизвестно. Можно угадать с первой попытки, добиться результата за 10–15 дней. Но иногда задача очень сложна: например, если в материале присутствует два *f*-элемента, их нужно изучать одновременно — могут проявиться синергетические свойства (взаимно усиливающие или ослабляющие друг друга). При нерациональном методе синтеза один химический элемент мешает другому, и решить проблему удастся не сразу. Показательный пример — исследование в лаборатории координационных соединений совместной люминесценции европия (Er) и тербия (Tb), находящихся в степени окисления +3: смешивание этих элементов в различных пропорциях долгое время не приводило к усилению сигнала. Оптимальное соотношение составило 99% тербия и 1% европия. Эти эксперименты в данный момент продолжаются с более сложными смесями — европия, тербия и гадолиния (Gd). Первый результат введения нового элемента вызывает оптимизм — удалось дополнительно усилить сигналы люминесценции, но впереди еще много работы. Есть «треугольник» элементов, нужно найти оптимальное сочетание сил, действующих в смеси, но эти силы пока еще не до конца известны: необходимо экспериментально установить, как тот или иной фактор воздействует на результат.

В завершение темы современной роли Периодической таблицы как профессионального инструмента химиков приведу еще один пример. Если сравниваешь элементы одной группы в семействе переходных металлов, то нужно представлять себе степень различия свойств их валентных *d*-орбиталей: *3d*-орбитали существенно отличаются

от *4d*-, последние же очень похожи на *5d*-орбитали. И это знание дает возможность, грамотно подбирая электронные конфигурации катионов металлов, делать так, чтобы они имели магнитный аналог в *3d*-ряду и немагнитный в *4d*-. А если это удалось, то можно временно забыть («вычесть») магнитную составляющую и исследовать другие факторы, воздействующие на свойства вещества. Например, выяснить, каков вклад фононного\* согласованного колебания решетки или движения электронов проводимости.

Для нас, химиков, это очень интересные объекты, которые мы синтезируем, а затем исследуем совместно с физиками, так как для этого необходимы знания в области физики конденсированного состояния.

### Создание уникальных биосенсоров и Периодическая таблица

доктор химических наук Аркадий Аркадьевич Карякин,  
профессор, заведующий лабораторией  
электрохимических методов кафедры аналитической химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Если вы откроете любой журнал по химии, начиная с самых солидных, например «Journal of the American Chemical Society», то найдете множество упоминаний Периодической таблицы химических элементов, даже если она не будет напрямую указана. Современное развитие Периодической системы — удел неорганической химии и радиохимии. Однако и в исследованиях других специалистов, в том числе энзимологов и аналитиков, она играет важную роль. В том числе и мы в конце 2018 г. опубликовали в упомянутом «Journal of the American Chemical Society» статью, посвященную синтезу наночастиц берлинской лазури, которые по своей каталитической активности превосходят природные пероксидазы (окислительно-восстановительные ферменты, использующие в качестве акцептора электронов перекись водорода, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [6]. Рассказывая о природе уникальных свойств материала, из которого синтезированы наночастицы, мы упоминаем о соседях железа по «триаде» — прямо, таким образом, ссылаясь на Периодическую систему элементов.



А.А.Карякин.

\* Фонон представляет собой квант колебательного движения атомов кристалла.

Одно из направлений работы нашего исследовательского коллектива — создание электрохимических биосенсоров, применимых в различных сферах жизнедеятельности человека, в частности в медицинской диагностике. Около 25 лет назад мы синтезировали лучший электрокатализатор восстановления пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) [7, 8] — важнейшего метаболита и индикатора воспалительных процессов в живом организме, а также побочного продукта каталитических реакций с участием ферментов оксидаз. В числе последних наиболее известна глюкозооксидаза, которая используется для определения концентрации глюкозы в крови. Созданный электрокатализатор в 1000 раз активнее и в 1000 раз селективнее (избирательнее) обычно используемой платины. Биосенсоры на его основе по всем аналитическим характеристикам превосходят упоминаемые в литературе аналоги, обеспечивая развивающиеся в настоящее время в лаборатории подходы к неинвазивной диагностике. В частности, показана ее принципиальная возможность [9] и разрабатываются лабораторные образцы аналитических систем для неинвазивного мониторинга сахарного диабета.

### Research tool и инструмент для систематизации знаний

доктор химических наук Александр Васильевич Яценко,  
профессор кафедры общей химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Какой смысл вы вкладываете в определение «научная икона»? Обычно так говорят, имея в виду предмет уважаемый, но не приносящий непосредственной практической пользы. Наверное, неправильно говорить о Периодической таблице в таком ключе. Хотя, конечно, я не могу представить себе современного химика, который сидит, наморщив лоб, над Периодической таблицей, разглядывает ее и пытается делать на этой основе какие-то заключения. Но наши аналогии, ассоциации — во многом оттуда. Это и универсальный язык, и систематика. Смысл терминов «переходные металлы первого ряда», «щелочные металлы», «галогены», «халькогены» химики всего мира понимают одинаково: речь идет о группах родственных элементов, обладающих близкими свойствами, что обусловлено сходством в электронном строении их атомов. А Периодическая система

элементов как раз и отражает аналогии в их электронном строении. Пожалуй, можно провести аналогию (не для всех очевидную) с таблицей умножения, которой почти безотчетно пользуются математики и вообще все, кто совершает вычисления, — обойтись без такого инструмента невозможно, во всяком случае это страшно усложнило бы жизнь: попробуйте, к примеру, возвести 10 в квадрат путем сложения.

На основе Периодической таблицы сегодня создают современные интерфейсы систем поиска информации — например, с помощью таблицы Менделеева обеспечивается гибкий поиск в Кембриджской базе структурных данных. В данном случае она становится именно research tool, т.е. инструментом, причем удобным. Оперирование подобными базами данных играет важную роль в работе исследователей, в том числе работающих так же, как я, в области органической кристаллографии. И действительно, если мы ставим задачу синтезировать новое вещество, определенным образом модифицируя молекулу, то должны в первую очередь выяснить, какие соединения, похожие на полученное нами, известны и каковы их строение и свойства. Структура каждого нового вещества — предмет публикации в научном журнале (иногда — высокорейтинговом) и депонирования в международной базе данных (ему предшествует экспресс-проверка на фальсификацию).

Мои научные интересы связаны с красителями и пигментами, точнее, в настоящее время — с веществами класса азокрасителей. Разные кристаллические модификации пигмента не одинаковы по цветовым характеристикам, например, они имеют более или менее приятные оттенки, что объясняется характерным спектром поглощения: если химическое соединение поглощает

свет в узком диапазоне длин волн, мы однозначно воспринимаем его цвет как чистый, насыщенный, и, наоборот, при поглощении им света в широком диапазоне или при появлении в его спектре дополнительных полос возникает впечатление, что краски «грязные». Эти особенности обусловлены строением молекул вещества и тем, как они упакованы в кристалле. Так вот, оказалось, что в процессе кристаллизации цвет азокрасителя немного меняется, и при нанесении на поверхность даже одного и того же пигмента, но с помощью разных технологий (посредством упаривания его рас-



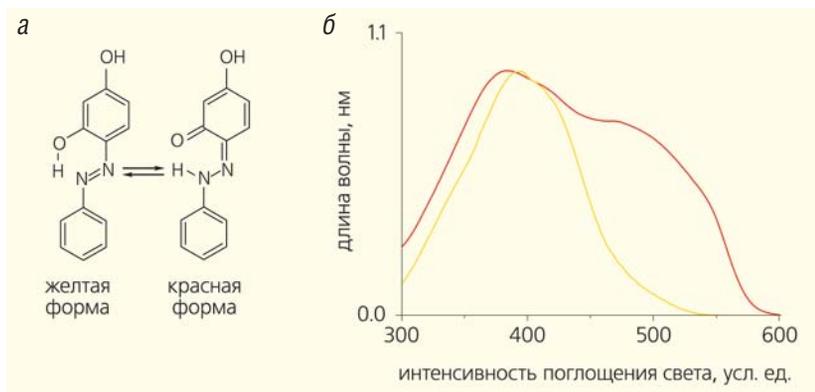
А.В.Яценко.

твор в ацетоне либо в хлористом метиле) цвет покрытия будет варьироваться.

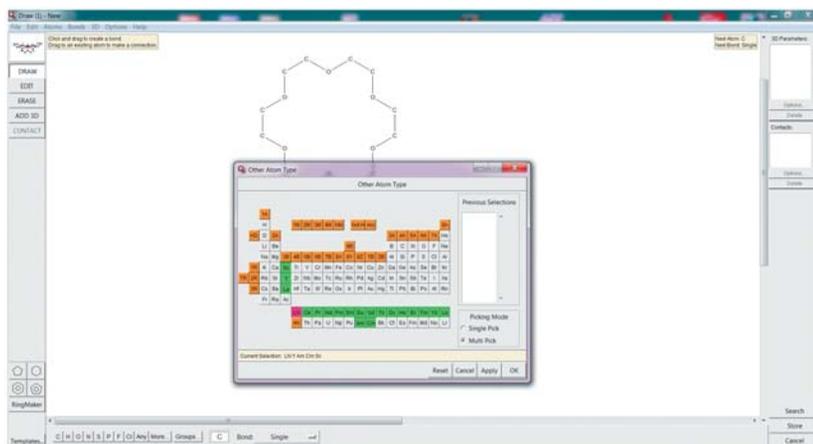
Возникла гипотеза о различии структуры молекул азокрасителя, находящегося в растворе и в кристаллическом состоянии. Для ее проверки мы вырастили в лаборатории несколько монокристаллов, провели их рентгеноструктурный анализ и определили: да, действительно, в процессе кристаллизации азокрасителя при условии формирования определенной системы водородных связей происходит перемещение атома водорода из одного положения в другое — так называемый таутомерный сдвиг. Таутомерия — хорошо известное явление, но в данном случае мы открыли неизвестный ранее механизм изменения цвета у определенного класса красителей, связанный с влиянием межмолекулярных взаимодействий в кристаллическом состоянии. И для того чтобы подтвердить его универсальность, в ближайшее время нужно провести серию экспериментов, а также показать с помощью квантово-химических расчетов, что в определенных условиях будет устойчива та или иная форма молекулы азокрасителя.

Примечательно, что синтетические азокрасители, которые мы сейчас изучаем, имеют очень широкое и разнообразное применение. Так, в 1970-е годы выяснилось, что красители антрахинонового ряда, известные с XIX в., после небольшой химической модификации могут быть использованы для лечения онкологических заболеваний. Первоначально открыли антрациклиновые антибиотики, затем разобрались с механизмом их действия и установили: они имеют не только противомикробную, но и противоопухолевую активность в связи с тем, что их плоские молекулы встраиваются между парами азотистых оснований, образуя стойкий комплекс с ДНК и блокируя ДНК-зависимый синтез РНК. Дальнейший поиск веществ ант-

рациклинового ряда, малотоксичных и подходящих для применения в онкологии, привел, например, к открытию даунорубина, с точки зрения строения молекулы — родного брата антрахиноновых красителей.



Одно и то же вещество может существовать в разных таутомерных формах (а) и эти формы имеют разные спектры поглощения (б), а, следовательно, разный цвет (желтый и красный).



Периодическая таблица в интерфейсе поисковой системы.



Современные исследования невозможны без приборов, позволяющих быстро получать результаты и анализировать их при помощи баз данных.

Иногда сожалеешь о том, что первые статьи Менделеева, датируемые началом 1860-х, современным химикам уже сложно воспринимать, настолько изменился наш профессиональный язык. В читальном зале библиотеки химического факультета студенты и сотрудники имеют возможность просматривать журналы «Chemische Berichte», издававшиеся с 1868 г. Так вот, читая статьи 1890-х годов, прекрасно понимаешь, о чем идет речь, хотя их язык и не идентичен современному. Но самые ранние выпуски журнала, увы, подобны «Слову о полку Игореве» — язык химии тогда отличался от современного. Между тем Периодическая таблица химических элементов, ставшая всеобщим достоянием в 1869 г., сегодня — важнейший инструмент систематизации знаний. И спустя 150 лет она представляет собой исключительную ценность для нашей преподавательской и научной работы.

### Периодическая таблица — динамично развивающаяся система

доктор химических наук Александр Вадимович Иванов,  
доцент кафедры аналитической химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
заведующий лабораторией аналитической химии  
и методов разделения  
Института общей и неорганической химии  
имени Н.С.Курнакова РАН

Даже если в своих научных исследованиях я не обращаюсь к Периодической таблице химических элементов явно, все же, не замечая того, постоянно сверяюсь с ней, ведь периодический закон Д.И.Менделеева наряду с теорией строения органических веществ А.М.Бутлерова, первым и вторым законами термодинамики — тот фундамент, на котором развивается современная химия.

Как преподаватель, я готовлю для работы в учебном практикуме по аналитической химии определенные смеси катионов и анионов, и, когда студенты приступают к решению практической задачи, иногда приходится давать им подсказки из Периодической таблицы. Так, ионы никеля, железа, соответствующие элементам, которые находятся в середине периода и имеют незаполненную *d*-орбиталь, будут образовывать комплексные соединения с объемными органическими лиганда-

ми\* — например, азотсодержащими, и наоборот, ионы цинка, меди, серебра, т.е. элементов с заполненной *d*-орбиталью, вступят в реакцию с неорганическими ионами (например, сульфид-ионом) или серосодержащими лигандами достаточно компактного строения и т.п. По сути дела, все взаимосвязи, с которыми мы встречаемся в экспериментах, построены на периодическом законе.

Для любого химика (и для людей многих других профессий) Периодическая таблица химических элементов — инструмент, меняющийся во времени, совершенствующийся. Я полагаю, что икона — это все же что-то неизменяемое, незыблемое, чему можно поклоняться, но что нельзя использовать, а значит, в данном случае эпитет «научная икона» весьма неточен.

Существует множество современных версий Периодической таблицы: с короткими периодами (все помнят ее со школы), с длинными (активно внедряется в научную практику последние 30 лет), со сверхдлинными периодами, объемный и винтовой варианты. Но суть системы — характер периодичности свойств химических элементов — сохраняется. Подобное изменение «дизайна» Периодической таблицы возвращает к мысли о сходстве с инструментом: в зависимости от сложности задачи он может быть сконструирован тоньше или грубее, но принцип действия сохраняется. Это инструмент из числа незаменимых. Слова Менделеева о том, что периодическому закону будущее сулит только развитие, оказались пророческими. Мы этому свидетели: если около 40 лет назад Периодическую таблицу завершал 105-й элемент — нильсборий (Ns)\*\*, то в наше время известно 118 химических элементов, и продолжается открытие новых, короткоживущих. Исследо-

ватели ждут появления более стабильных элементов, что станет очередным подтверждением периодического закона.

История и предыстория открытия этого фундаментально-



А.В.Иванов.

\* Лиганд — ион или молекула, присоединяющаяся к так называемому центральному атому — иону металла-комплексообразователя, в результате образуется комплексное соединение; такие реакции очень часто применяют в химическом анализе. Неорганические лиганды, как правило, имеют более простое строение и малый объем —  $F^-$ ,  $S^{2-}$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$  и т.д.; органические лиганды (например, бипиридил, пиридилазонафтол, этиленгликоль) отличаются существенно более сложной структурой и большим объемом.

\*\* С конца 1990-х годов этот элемент называют «дубний» (Db).

го закона природы очень интересны. В 1829 г. немецкий ученый Иоганн Дёберейнер пришел к пониманию периодичности свойств химических элементов и попытался создать систему триад. В ряде случаев ему удалось объединить элементы в триады, в которых атомный вес «среднего» элемента равнялся полусумме первого и третьего, однако правило срабатывало не всегда: не хватало точных данных об атомных массах и свойствах элементов. В 1843 г. соотечественник Дёберейнера химик-неорганик Леопольд Гмелин предложил систему триад, тетрад и пентад элементов, также несовершенную. В 1862 г. французский исследователь Александр Шанкуртуа потерпел неудачу в попытке выстроить последовательность элементов по их атомным весам в виде спирали: в одну группу попадали элементы, совершенно разные по химическим свойствам (вероятно, потому, что еще не были открыты инертные газы, галлий, германий и т.д.). Два года спустя (в 1864–1865 гг.) британский ученый Джон Ньюлендс распределил элементы по аналогии с музыкальными октавами, поскольку заметил, что как восьмая нота повторяет первую в нотном стане, так и восьмой элемент повторяет свойства первого химического элемента и т.д. Он даже попробовал описать эту последовательность с помощью звукоряда, распределяя элементы по возрастанию атомного веса. Но... «гармония» нарушалась там, где должны были находиться еще не открытые в то время галлий и германий. Ближе всех подошел к разгадке периодичности Юлиус Майер (Германия). В 1864–1867 гг. он составил систему химических элементов, в основе которой была валентность (как известно, большинство элементов имеет несколько валентностей). И Майер не стал включать в таблицу те элементы, которые нарушали бы найденную им закономерность.

Очевидно, что в 1860-х годах назрела необходимость систематизации элементов. И именно Менделеев в 1869 г. сформулировал периодический закон в самой оптимальной форме. А через несколько лет — в 1875 г. — французский химик Леккок де Буабодран впервые получил элемент галлий, предсказанный Менделеевым.

Личность Менделеева уникальна, и очень жаль, что распространение нескольких легенд о нем — в частности, о приснившейся Периодической таблице — затмевают истину. В действительности трудная и упорная работа над Периодической системой заняла у Менделеева несколько лет, он сам писал об этом. Циклические изменения свойств химических элементов он заинтересовался задолго до своего открытия.

Менделеев писал некоторые свои книги как учебники. Среди них — двухтомник «Основы хи-

**Периодическая система элементов по группам и рядам.**

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ:											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1		Водород. H 1,008										
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Бериллий. Be 9,1	Бор. B 11,0	Углерод. C 12,0	Азот. N 14,01	Кислород. O 16,00	Фтор. F 19,0				
3	Неон. Ne 19,9	Натрий. Na 23,05	Магний. Mg 24,36	Алюминий. Al 27,1	Кремний. Si 28,2	Фосфор. P 31,0	Сера. S 32,06	Хлор. Cl 35,45				
4	Аргон. Ar 38	Калий. K 39,15	Кальций. Ca 40,1	Скандий. Sc 44,1	Титан. Ti 48,1	Ванадий. V 51,2	Хром. Cr 52,1	Марганец. Mn 55,0	Железо. Fe 55,9	Кобальт. Co 59	Никель. Ni 59	(Cu)
5		Медь. Cu 63,6	Цинк. Zn 65,4	Галлий. Ga 70,0	Германий. Ge 72,5	Мышьяк. As 75	Селен. Se 79,2	Бром. Br 79,95				
6	Криpton. Kr 81,8	Рубидий. Rb 85,5	Стронций. Sr 87,6	Иттрий. Y 89,0	Цирконий. Zr 90,6	Нобий. Nb 94,0	Молибден. Mo 96,0		Рутений. Ru 101,7	Родий. Rh 103,0	Палладий. Pd 106,5	(Ag)
7		Серебро. Ag 107,38	Кадмий. Cd 112,4	Индий. In 115,0	Олово. Sn 119,0	Сурьма. Sb 120,2	Теллур. Te 127		Йод. J 127			
8	Ксенон. Xe 128	Цезий. Cs 132,9	Барий. Ba 137,4	Лантан. La 138,9	Церий. Ce 140,2							
9												
0				Иттербий. Yb 173		Тантал. Ta 183	Вольфрам. W 184		Осмиум. Os 191	Иридий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au)
1		Золото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Таллий. Tl 204,1	Свинец. Pb 208,5	Висмут. Bi 208,5						
2			Радий. Ra 225		Торий. Th 232,5		Уран. U 238,5					

Высшие солеобразные окислы:  
R R'O RO R'O<sup>3</sup> RO<sup>2</sup> R'O<sup>5</sup> RO<sup>3</sup> R'O<sup>7</sup> RO<sup>4</sup>  
Высшие газообразные водородные соединения:  
RH<sup>4</sup> RH<sup>3</sup> RH<sup>2</sup> RH

Д. Менделеев.  
1869—1905.

Вариант Периодической таблицы элементов.

мии», который в СССР переиздавали в 1930–1950-х годах, как и некоторые другие его фундаментальные труды. Но по терминологии, по стилю эти работы, увы, устаревают, и сейчас, вероятно, их читают только историки науки. Периодический закон — живой, развивающийся инструмент, автор же этого великого открытия — в определенном смысле «канонизированный» ученый.



В лаборатории химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

## Идея периодичности естественных систем

доктор химических наук Евгений Вениаминович Бабаев,  
профессор, ведущий научный сотрудник  
кафедры органической химии  
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Всю свою жизнь собираю исторические факты, связанные с Д.И.Менделеевым, с родом Менделеевых и обобщаю материалы, касающиеся Периодической таблицы химических элементов. Вообще-то я мечтал стать историком, но в школе в пятом классе на меня большое впечатление произвел вечер химических опытов, а потом в книжке «Химия и радиоматериалы» я впервые увидел Периодическую таблицу Д.И.Менделеева — и это было настоящее потрясение.

В 1980-е годы меня заинтересовал вопрос: почему не предпринимаются попытки систематизации молекул по аналогии с таблицей химических элементов? И я организовал на факультете междисциплинарный семинар «Принципы симметрии и системности в химии», в котором участвовали химики, математики и минералоги, а затем опубликовал в одноименном сборнике и в книге «Философские проблемы химии» первые статьи о периодической системе молекул, предложив оригинальную версию их группировки [10, 11]. Идея заключалась не в предсказании конкретных свойств, а в том, чтобы объединить исходные молекулы в ансамбли. Отклики были самые полярные. А в 1989 г. на XIV Менделеевском съезде в Ташкенте я познакомился с профессором Алоисом Хаасом из Рурского университета в г.Бохуме (Германия), и оказалось, что мы единомышленники. Начался новый период работы — встречи с рядом зарубежных исследователей, которые также пробовали составлять периодические таблицы молекул.

Хаас занимался периодической классификацией функциональных групп органических и неорганических веществ и ввел принцип параэлементов. Он заметил, что свойства небольших одновалентных радикалов, окруженных атомами фтора ( $\text{NF}_2$ ,  $\text{CF}_3$ ,  $\text{SCF}_3$ ,  $\text{N}(\text{CF}_3)_2$  и др.), очень напоминают свойства галогенов (именно так возник термин «парагалогены»). Затем оказалось, что и двухвалентные перфторированные группы напоминают кислород или серу и т.д. [12, 13]. Опираясь на выявленную аналогию, этот ученый построил периодическую систему фторсодержащих функциональных групп (параэлементов), напоминаю-

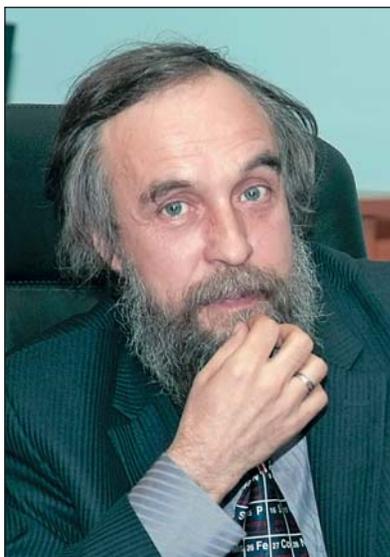
щую Периодическую таблицу Д.И.Менделеева [12] и предсказал ряд свойств новых параэлементов, а затем синтезировал неизвестные науке перфторированные соединения, образовавшие ранее не описанные подклассы веществ.

Энтузиастом поиска периодичности в молекулярной структуре веществ был американский физик Рей Хефферлин (1929–2015, Коллидждейл, США). Он строил объемные (трехмерные) таблицы двухатомных молекул [14] и методом интерполяции пытался оценить свойства неизвестных молекул.

Многих ученых проблема периодических классификаций увлекала и прежде [10, 11, 14]. В начале XX в. Н.А.Морозов (1854–1946) впервые подметил аналогию между системой элементов и таблицей гомологичных рядов углеводородов и использовал ее для прогноза тогда еще не открытых инертных газов. Позже советский химик-органик М.М.Шемьякин (1908–1970), немецкий исследователь Х.Г.Гримм (1887–1958) и польский химик А.И.Горский (1871–1924) пытались найти пути к решению проблемы периодической классификации [14]. По мере накопления данных о свойствах малых молекул их классификации разрабатывали такие исследователи, как С.А.Щукарёв (1864–1936), А.Ф.Конг, А.П.Монякин, В.В.Болдырев и др. Американский профессор Д.Диас из Канзасского университета предложил свой вариант периодической таблицы молекул бензеноидных углеводородов, основанный на регулярной повторяемости элементов симметрии при переходе к все более сложным молекулам. Наконец, можно найти отголоски принципов молекулярной периодичности и в известном принципе изолобальности Р.Хоффмана.

Мне повезло: я побывал на стажировках и у Хааса, и у Хефферлина, причем в соавторстве с последним мы опубликовали работу о проблеме молекулярной периодичности [14]. В основе нашего подхода (принципа гиперпериодичности, который Хефферлин любил называть «Babaev's Hyper-periodic Table» [15]) — следующая закономерность: ансамбли изовалентных молекул при внедрении группы с восемью валентными электронами порождают периодичность. Так мы описываем и обычную гомологию  $\text{CH}_2$ -групп (так называемое правило Морозова), и принцип параэлементов Хааса (внедрение атома фтора как лиганда).

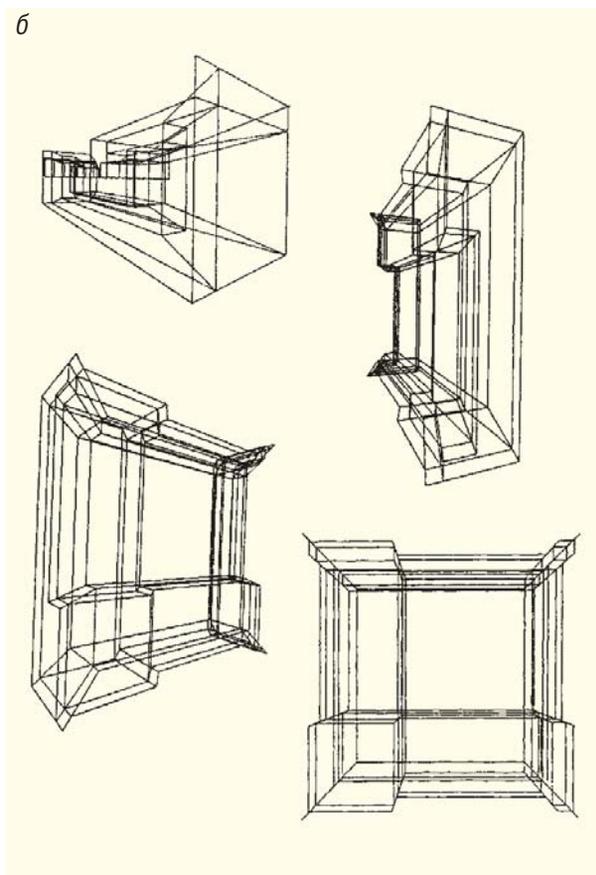
Квинтэссенцией поиска универсального подхода к систематизации молекул стала книга



Е.В.Бабаев.

**a**

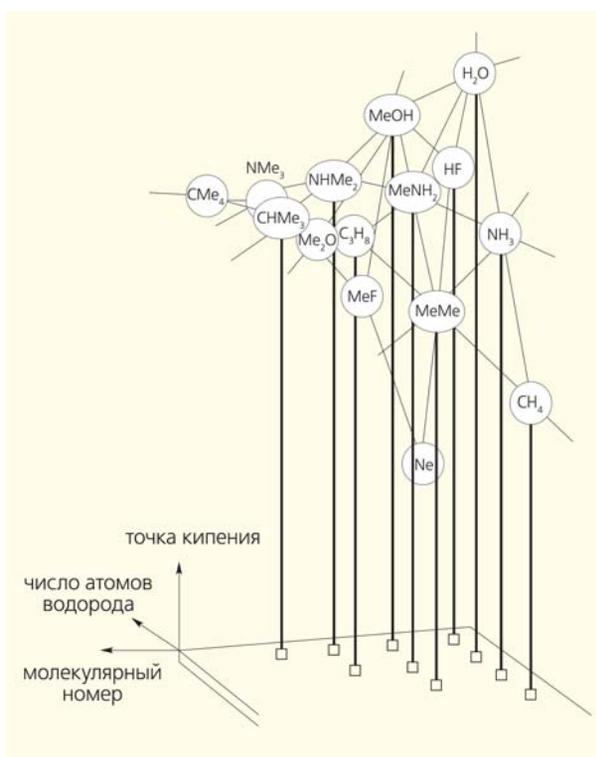
C	N	O	F	Ne	Na
	$\equiv\text{CF}$	$=\text{NF}$ $=\text{CF}_2$	$-\text{OF}$ $-\text{NF}_2$ $-\text{CF}_3$	$\text{F}_2$ $\text{OF}_2$ $\text{NF}_3$ $\text{CF}_4$	— — — $[\text{NF}_4]$
Si	P	S	Cl	Ar	K
	$\equiv\text{SiF}$	$=\text{PF}$ $=\text{SiF}_2$	$-\text{SF}$ $-\text{PF}_2$ $-\text{SiF}_3$	$\text{ClF}$ $\text{SF}_2$ $\text{PF}_3$ $\text{SiF}_4$	— $[\text{ClF}_2]$ $[\text{SF}_3]$ $[\text{PF}_4]$
C	N	O	F	Ne	
	$\equiv\text{CCF}_3$	$=\text{NCF}_3$ $=\text{C}(\text{CF}_3)_2$	$-\text{OCF}_3$ $-\text{N}(\text{CF}_3)_2$ $-\text{C}(\text{CF}_3)_3$	$\text{CF}_3-\text{F}$ $(\text{CF}_3)_2\text{O}$ $(\text{CF}_3)_3\text{N}$ $(\text{CF}_3)_4\text{C}$	
Si	P	S	Cl	Ar	
	$\equiv\text{SiCF}_3$	$=\text{PCF}_3$ $=\text{Si}(\text{CF}_3)_2$	$-\text{SCF}_3$ $-\text{P}(\text{CF}_3)_2$ $-\text{Si}(\text{CF}_3)_3$	$\text{CF}_3-\text{Cl}$ $(\text{CF}_3)_2\text{S}$ $(\text{CF}_3)_3\text{P}$ $(\text{CF}_3)_4\text{Si}$	
C	N	O	F	Ne	
	$\equiv\text{CSCF}_3$	$=\text{NSCF}_3$ $=\text{C}(\text{SCF}_3)_2$	$-\text{OSCF}_3$ $-\text{N}(\text{SCF}_3)_2$ $-\text{C}(\text{SCF}_3)_3$	$\text{CF}_3\text{S}-\text{F}$ $(\text{CF}_3\text{S})_2\text{O}$ $(\text{CF}_3\text{S})_3\text{N}$ $(\text{CF}_3\text{S})_4\text{C}$	



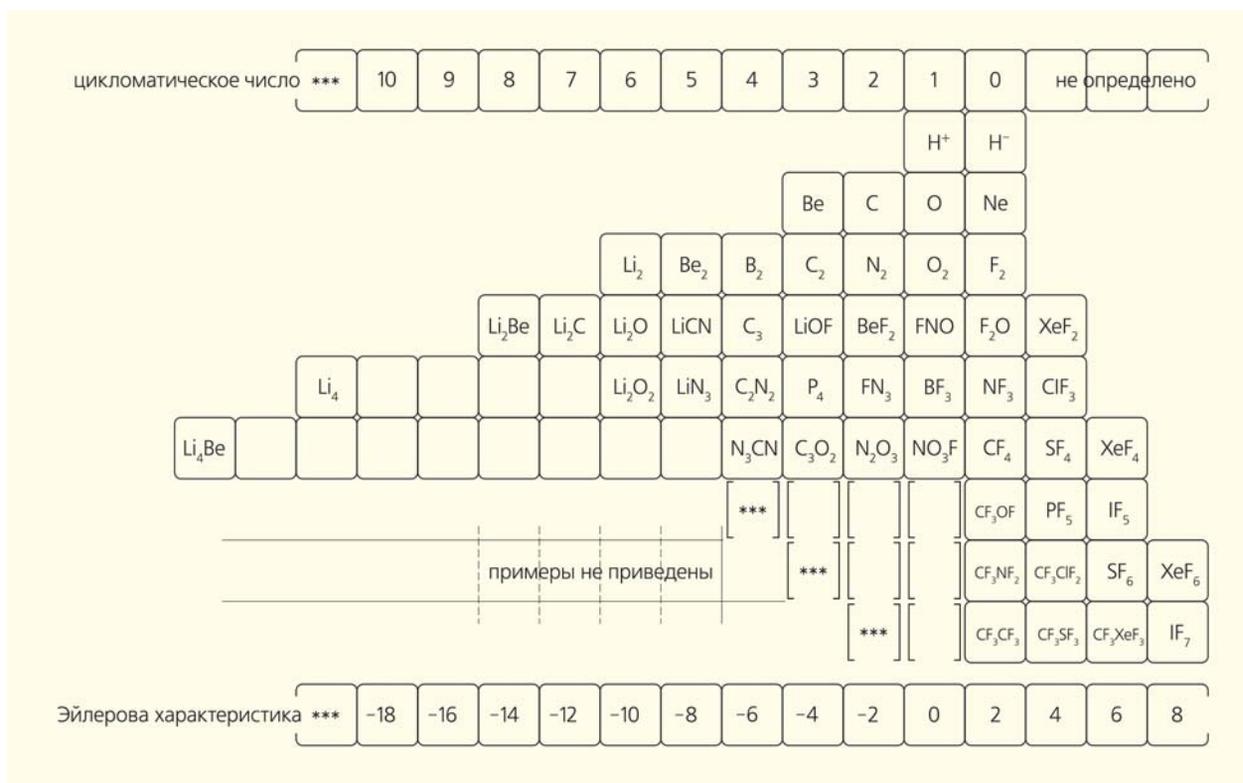
Примеры периодической классификации молекулярных структур: *a* — группировка фторсодержащих функциональных групп по принципу параэлементов Хааса; *b* — проекции четырехмерной таблицы двухатомных молекул Хефферлина в трехмерное пространство.

1999 г. «Chemical Topology: Introduction and Fundamentals», в которой мною написана глава «Интуитивные концепции химической топологии» [16]. Химическая топология — это представление структурных формул на языке теории графов и двумерных поверхностей. (Граф — абстрактный математический объект, представляющий собой множество вершин и набор ребер, т.е. соединений между парами вершин.) Показано, что ключевой инвариант химической структуры — это ее эйлерова характеристика, выводимая из баланса между числом атомов и валентных электронов или же из числа вершин, ребер и циклов молекулярного графа. Под циклами следует понимать не просто циклы разного размера, имеющиеся в молекулах, но и специфические «двучленные» (с двойными связями) и «одночленные» (с неподеленными парами электронов); чтобы их увидеть, молекулярный граф нужно в буквальном смысле «надуть» [17]. В результате можно впервые сформулировать неординарный закон о неизменности эйлеровой характеристики ансамбля молекул в ходе химической реакции.

Время от времени я читаю популярные лекции о периодичности, природной и искусственной (о том, что вообще бывает периодическим в мире), анализирую литературу, и оказывается, что постро-



Периодические системы веществ. Фрагмент периодической системы М.М.Шемякина.



Гиперпериодическая система молекул Е.Бабаева, 1987–1994 (по: [2, 4]). Показаны родоначальники изовалентных рядов.

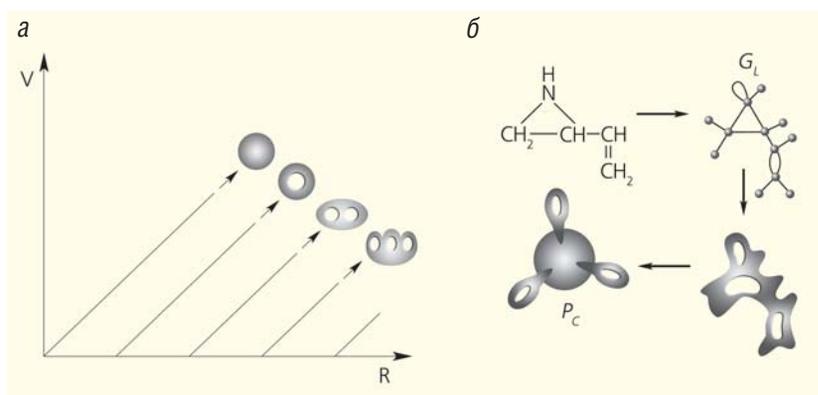
ение периодических систем в разных науках (например, биологии, геологии) — до сих пор открытая тема и тут возможно поступательное движение.

Периодичность в наших исследованиях иногда встречается совершенно неожиданно. Так, в начале 1990-х годов мы с коллегами нашли способ описания гетероциклических перегруппировок с помощью диаграмм (графов) [18]. И оказалось, что диаграммы — периодические. Но это не связано со свойствами элементов, из которых состоят химические вещества; в данном случае периодичность — свойство математических объектов, проявляющееся по мере их усложнения.

Говоря о Периодической таблице химических элементов, нельзя не упомянуть, что во многих странах работают ученые, увлеченные идеей улучшить ее классическую форму. Неудовлетворенность «несовершенством» облика графического изображения периодического закона присутствовала постоянно с момента его открытия и сохранилась у нескольких поколений исследователей (об этом свидетельствуют публикации в газетах и специализированных журналах, отечественных и международных, издававшихся с начала XX в. до 1980-х годов). Американский специалист по истории химии, в том числе по работам Д.И.Менделеева, Эрик

Сцерри (автор множества книг о периодичности, редактор обзора «От Менделеева до Оганессона» [19]) систематически проводит конференции с участием энтузиастов упомянутой идеи. Но речь идет, скорее, о «дизайне» таблицы, а ее суть — периодичность свойств химических элементов — не может принципиально измениться. Что же касается трансформации формы, то, как правило, это делает таблицу менее понятной.

Интервью подготовила  
**Е.В.Сидорова**



Представление структурных формул химических веществ на языке теории графов и двумерных поверхностей: а — распределение молекулярных графов по числу циклов; б — визуализация числа циклов в молекулярном графе.

## Литература / References

1. Allen L.C., Knight E. Electronegativity: why has it been so difficult to define? *Journal of Molecular Structure (Theochem)*. 1992; 261: 313–330, 316–317.
2. Антипов Е.В., Путилин С.Н. Рекордсмены среди сверхпроводников. *Природа*. 1994; 10: 3–16. [Antipov E.V., Putilin S.N. Record holders among superconductors. *Nature*. 1994; 10: 3–16. (In Russ).]
3. Fedotov S.S., Khasanova N.R., Samarin A.Sh. et al. AVPO4F (A = Li, K): A 4 V Cathode Material for High-Power Rechargeable Batteries. *Chemistry of Materials*. 2016. 28(2): 411–415. Doi:10.1021/acs.chemmater.5b04065.
4. Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. Синтез эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния. *Физика твердого тела*. 2014; 56(8): 1457–1485. [Kukushkin S. A., Osipov A.V., Feoktistov N. Synthesis of epitaxial silicon carbide by the method of substitution of atoms in the crystal lattice of silicon. *Solid state physics*. 2014; 56(8): 1457–1485. (In Russ).]
5. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014; 47(31): 1–41. Doi:10.1088/0022-3727/47/31/313001.
6. Komkova M.A., Karyakina E.E., Karyakin A.A. Catalytically synthesized Prussian Blue nanoparticles defeating natural enzyme peroxidase. *Journal of the American Chemical Society, United States*. 2018; 140: 11302–11307. Doi:10.1021/jacs.8b05223.
7. Karyakin A.A., Gitelmacher O.V., Karyakina E.E. A high-sensitive glucose amperometric biosensor based on prussian-blue modified electrodes. *Anal. Lett.* 1994; 27(15): 2861–2869. Doi:10.1080/00032719408000297.
8. Karyakin A.A., Gitelmacher O.V., Karyakina E.E. Prussian blue based first-generation biosensor — a sensitive amperometric electrode for glucose. *Anal. Chem.* 1995; 67(14): 2419–2423. Doi:10.1021/ac00110a016.
9. Karyakin A.A., Nikulina S. V., Vokhmyanina D.V., et al. Non-invasive monitoring of diabetes through analysis of the exhaled breath condensate (aerosol) *Electrochem. Commun.* 2017; 83: 81–84. Doi:10.1016/j.elecom.2017.09.005.
10. Бабаев Е.В. Пространство изостерных ансамблей как форма естественной системы молекул. Принципы симметрии и системности в химии. Ред. Степанов Н.Ф. М., 1987; 30–52. [Babaev E.V. Space of isosteric ensembles as a form of natural system of molecules. Principles of symmetry and sistemology in chemistry. Ed. Stepanov N.F. Moscow, 1987; 30–52. (In Russ).]
11. Бабаев Е.В. Возможна ли периодическая система молекул? Философские проблемы химии. М., 1988; 35: 121–140. [Babaev E.V. Is the periodic system of molecules possible? Philosophical problems of chemistry. М., 1988; 35: 121–140. (In Russ).]
12. Haas A. Periodic system of functional groups: formalism only or heuristic principles. *Pure Appl. Chem.* 1991; 63: 1577–1590. Doi:10.1351/pac199163111577.
13. Haas A. The Element Displacement Principle: A New Guide in p-Block Elements. *Adv. Inorg. Radiochem.* 1984; 28: 167–202.
14. Babaev E.V., Hefferlin R. The Concepts of Periodicity and Hyper-Periodicity: from Atoms to Molecules. In: *Concepts in Chemistry: a Contemporary Challenge*. Ed. Rouvray D. Research Studies Press, L., 1996; 24–81.
15. *Philosophy of Chemistry: Synthesis of a New Discipline*. Eds Baird D., Scerri E., McIntyre L. Dordrecht, 2006.
16. Babaev E.V. Intuitive Chemical Topology Concepts. In: *Chemical Topology: Introduction and Fundamentals*. Mathematical Chemistry Series. Chapter 5. Eds Bonchev D., Rouvray R. 1999; 167–264.
17. Babaev E.V. The invariance of molecular topology in chemical reactions. In: *Graph theoretical approaches to chemical reactivity*. Eds Bonchev D., Mekenyan O. Seria: Understanding Chemical Reactivity. Dordrecht; Boston; L., 1994; 9: 209–220.
18. Babaev E.V., Lushnikov D.E., Zefirov N.S. Novel graph-theoretical approach to ring-transformation reactions — hierarchical-classification and computer design of heterocyclic rearrangement. *Journal of the American Chemical Society*. 1993; 115(6): 2416–2427. Doi:10.1021/ja00059a042.
19. Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table. Scerri E., Restrepo G. (eds.). Oxford, 2018.

## Chemists on the Periodic Table: a Professional Tool, a Scientific Icon, or an Open Book?

E.V.Antipov<sup>1,3</sup>, E.V.Babaev<sup>1</sup>, V.P.Zlomanov<sup>1</sup>, A.V.Ivanov<sup>1,2</sup>, A.A.Karyakin<sup>1</sup>, A.V.Shevelkov<sup>1</sup>, A.V.Yatsenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

<sup>2</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry (Moscow, Russia)

<sup>3</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology (Moscow, Russia)

The review presents detailed and reasoned answers of the scientists of Chemical Faculty of Moscow State University to the questions of the editorial board on a role of “the main icon of chemistry” — the Periodic Table of Elements — in their scientific work; whether its value as a scientific instrument decreases at the beginning of the XXI c. The answers of the researchers are related to their specialization (inorganic chemistry, electrochemistry, analytical chemistry, organic chemistry, enzymology, etc.) and to their teaching activities. The role of the Periodic Table in the creation of new chemicals of specific value for basic research and applied problems is considered. The importance of the Periodic Table as a tool for systematization of knowledge of beginning chemists is analyzed.

**Keywords:** Periodic Table of Elements, D.I.Mendeleev, Faculty of Chemistry of Moscow State University.

# Открытие периодического закона: три загадки и одна легенда

И.С.Дмитриев

Музей-архив Д.И. Менделеева, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

История открытия периодического закона сложна и таит в себе множество загадок. В статье рассмотрены три из них: как Д.И.Менделеев, не признававший атомную теорию, создал Периодическую систему элементов; почему он не торопился лично доложить о своем открытии научному сообществу; почему спустя год и девять месяцев после открытия периодического закона Менделеев резко изменил тематику своих исследований. Кроме того, в статье приводятся факты, противоречащие распространенной версии, согласно которой периодическая таблица явилась ее автору как озарение во сне.

**Ключевые слова:** Д.И.Менделеев, Л.Мейер, Н.А.Меншуткин, периодический закон, мировой эфир.

Дмитрий Иванович Менделеев был ученым-энциклопедистом. Однако при всем разнообразии его интересов и плодотворных начинаний открытие периодического закона представляется все же главным достижением исследователя. Вместе с тем история этого открытия (как, кстати, и сам Периодический закон) таит в себе множество неясностей и неожиданных поворотов. Назовем их (с известной долей условности) загадками. Кроме того, весьма популярна легенда, будто периодическая таблица явилась Менделееву во сне. Я остановлюсь только на трех загадках, которые можно разъяснить, опираясь на известные факты и дошедшие до нас документы.



**Игорь Сергеевич Дмитриев**, доктор химических наук. Член правления Санкт-Петербургского отделения Российского химического общества имени Д.И.Менделеева, член History of Science Society (США), член редколлегии журнала «Природа». Автор 150 научных работ, в том числе монографии «Человек эпохи перемен: очерки о Д.И.Менделееве и его времени». Область научных интересов — интеллектуальная революция XVI–XVII вв., история науки в России XVIII — начала XX в.  
e-mail: isdmitriev@gmail.com

## Менделеев против атомов

Первая статья Менделеева о периодическом законе начиналась следующими словами: «Систематическое распределение элементов подвергалось в истории нашей науки многим разнообразным превращениям» [1, с.10]. Это так. Но об одном обстоятельстве Дмитрий Иванович умолчал: проблема «систематического распределения элементов» была для научного сообщества сугубо маргинальной, а то и просто недостойной внимания серьезного ученого. К примеру, когда один из предшественников Менделеева — Джон Ньюлендс (J.Newlands) — представил Лондонскому химическому обществу свой вариант классификации элементов (так называемый закон октав), один из присутствовавших заметил: «А не пытался ли он [Ньюлендс] расположить элементы по алфавиту? Ведь любое расположение их может представлять случайные совпадения (occasional coincidences)» [2, p.113].

Таким образом, Менделеев взялся за тему, которая в то время не только не представлялась актуальной, но и вызывала насмешки. Иначе и быть не



Распределение работ Д.И.Менделеева по областям знаний.

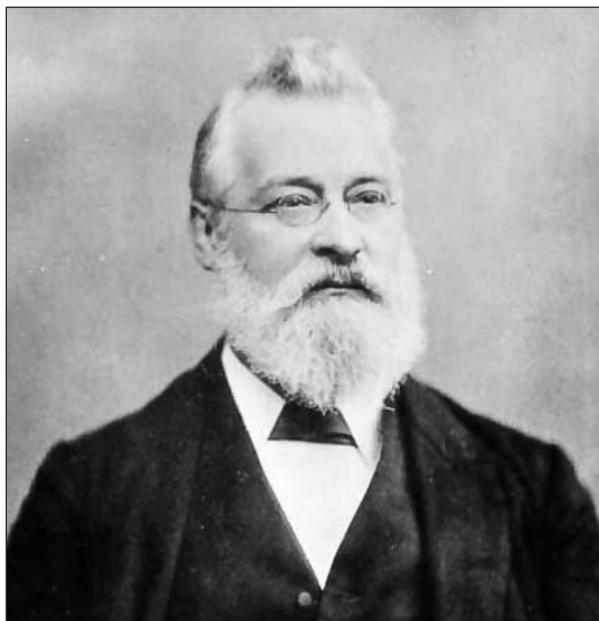
могло, поскольку даже после Первого международного химического конгресса в Карлсруэ (сентябрь 1860 г.) далеко не все химики приняли предложенную С.Канниццаро шкалу атомных весов, практически совпадающую с современной\*. Характерный пример — учебник Менделеева «Органическая химия» (второе издание: август 1863 г.). Отметив прогресс в решении вопроса об атомных весах элементов, Дмитрий Иванович предложил таблицу, в которой среди прочего приведены и такие величины атомных весов: Si = 14, Ca = 20, Ba = 68.5, Fe = 28, Zn = 32.7, Cu = 31.7 и т. д. В оправдание своего выбора он привел весьма странный аргумент: «Эти изменения столь недавно обратили на себя внимание, что не успели войти в общее употребление» [3, с.39] Более того, в его курсе лекций по общей и неорганической химии (октябрь 1867 г.!) снова приводятся все те же Ca = 20, Al = 13.5, Cd = 56 и т.д. [4].

Но этого мало. Атом в 19-м столетии понимали не как некий «кирпич мироздания», нечто неделившееся, но как минимальное количество элемента, которое присутствует во всех его соединениях и сохраняется в ходе химических превращений. Иными словами, словом «атом» фактически обозначали стехиометрический минимум для данного элемента. При этом подразумевалось (теми, кто вообще принимал атомную гипотезу), что кроме этих «химических» атомов есть еще атомы истинные, «физические», о которых мало что известно, и одновременно молчаливо допускалась принципиальная возможность открытия ранее неизвестного соединения элемента такого состава, что придется принятый атомный вес элемента уменьшить в разы (скажем, для азота принять N = 7 или какое-то иное значение). Менделеев, вполне осознававший это обстоятельство, пошел дальше. Он всю свою научную жизнь предостерегал окружающих против увлечения атомистикой. Вот несколько подтверждающих это цитат.

«...Химики постоянно употребляют атомическую гипотезу для более ясного представления многих фактов, хотя можно было бы обойтись и без нее. <...> Но атомическую теорию не нужно принимать как настоящую гипотезу о структуре тела, в этом отношении она не привела еще почти ни к каким результатам. Она должна быть принята как облегчение рассуждений» (1864) [5, с.25].

«...Само название (атомный вес) включает в себе, конечно, гипотезу об атомном строении тел, но... речь идет не о названии (мне кажется, что, заменяя название “атомный вес” названием “элементарный вес”, можно достичь устранения представления об атомах, когда речь идет об элементах), а о понятии, которое им условлено означать» (1871) [6, с.104].

\* В настоящее время принято выражение «атомная масса», но я буду придерживаться исторической терминологии.



Джон Ньюлендс (1837–1898), английский физик и химик. В 1864 г. опубликовал таблицу, в которой расположил все известные элементы в порядке увеличения их атомных весов, используя данные С.Канниццаро. Ньюлендс пронумеровал элементы, сопоставил их номера с их свойствами и, отметив, что элементы с аналогичными свойствами регулярно повторяются, сделал вывод: «восьмой элемент, начиная с данного элемента, является своего рода повторением первого, подобно восьмой ноте октавы в музыке...». Хотя термин «периодичность» он не употреблял, но по сути речь шла именно о периодическом изменении свойств элементов.

«...В атомах есть простота представления, но нет уверенности» (1906 г. — последнее издание учебника Д.И. Менделеева «Основы химии») [7, с.485].

Итак, ученый, открывший периодический закон, согласно которому «*физические и химические свойства элементов, проявляющиеся в свойствах простых и сложных тел, ими образуемых, стоят в периодической зависимости... от их атомного веса*» [8, с.907], не верил в атомную теорию. В этом состоит первая странность или загадка менделеевского открытия. Что же он тогда классифицировал? Что заложил в основание своей классификации?

Прежде всего, Менделеев еще до создания Периодической системы строго разграничил понятия «элемент» и «простое тело». Он с самого начала строил именно систему химических элементов, а не простых тел. Понятие элемента соотносилось им с наименьшим весовым количеством материи определенного вида, входящим в частицы (молекулы) тел. Элемент в понимании Менделеева — это «отвлеченное понятие», «материя, содержащаяся в простом теле и могущая без изменения в весе переходить во все тела, получающиеся из этого тела» [9, с.199].

Менделеев подчеркивает, что элемент может принимать различные конкретные формы (на-

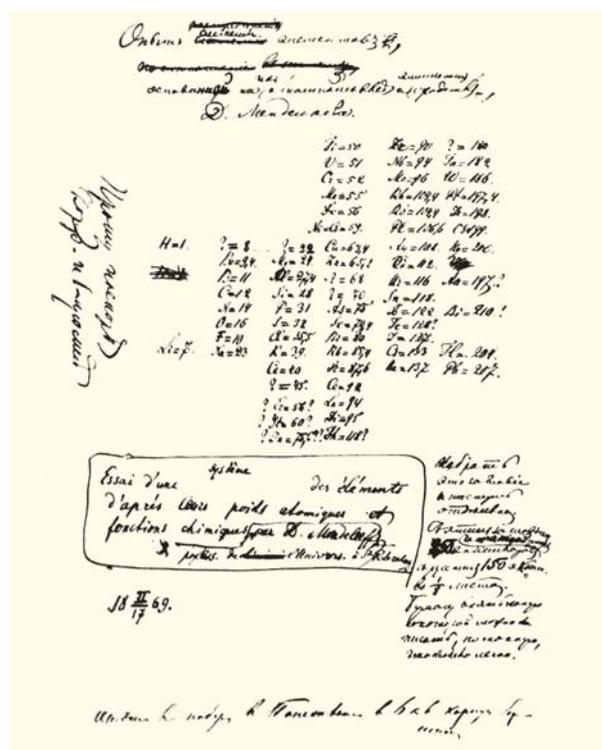
пример, элемент углерод может находиться в форме угля, алмаза и графита, а также входить в состав разнообразных соединений). Элемент, по мысли Менделеева, будучи «не конкретным телом», но «материально однородным» «весомым веществом с суммой ему одному принадлежащих свойств» [10, с.239], потенциально содержит в себе *весь спектр* возможных форм, свойств и состояний, которые этот «стехиометрический минимум» способен выявлять и разворачивать в определенных условиях. Возможность (или невозможность) образования тех или иных соединений, аллотропных модификаций, металлических или иных состояний и т.п. — все это в «свернутом» виде включено, «втянуто» в понятие элемента, в силу чего систематика элементов обретает общехимическое (а потому и общенаучное) значение. Скажем, простое тело озон — одна из актуализаций того, что потенциально наличествует в идеальном химическом объекте, — элементе кислород. Таким образом, Менделеев классифицировал «элементарные индивидуумы», природа которых определялась их атомным весом (Дмитрий Иванович предпочел бы говорить об «элементарном весе», но не пошел против устоявшейся терминологии).

Такая постановка задачи наряду с другими факторами позволила ученому создать Периодическую систему, но представление об элементарных индивидуумах помешало ему принять открытие радиоактивности, электронов и многие крупные достижения науки конца XIX — начала XX вв. Он корил современную ему научную мысль за то, что она «запуталась в ионах и электронах» [9, с.436].

### Дыра от сыра

Как известно, в понедельник 17 февраля\* 1869 г., который считается днем открытия периодического закона (а если выразаться точнее, совершения Менделеевым прорыва в поисках рациональной классификации элементов), Дмитрий Иванович должен был отправиться в командировку в Тверскую губернию для того, чтобы обследовать артельные сыроварни Н.В.Верещагина (брата известного художника-баталиста). Однако полученные им после долгих поисков первые результаты в построении системы элементов вынудили его отложить поездку на 12 дней, чтобы закончить статью «Соотношение свойств с атомным весом элементов». В эти дни Менделеев упорно работал, часами стоя за конторкой. Дописав статью, он передал рукопись Н.А.Меншуткину для публикации в «Журнале Русского химического общества» (РХО) и для

\* Далее даты, если не оговорено, приводятся по старому стилю, для перевода в новый стиль следует прибавить 12 дней.



Беловой вариант «Опыта системы элементов» с датой: 17 февраля (ст. ст.) 1869 г.

### ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ

	Ti = 50	Zr = 90	? = 180		
	V = 51	Nb = 94	Ta = 182		
	Cr = 52	Mo = 96	W = 186		
	Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4		
	Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198		
	Ni = 59	Pd = 106,6	Os = 199		
H = 1	Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200		
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
C = 12	Si = 28	? = 70	Su = 118		
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yl = 60	Di = 95		
		?In = 75,6			

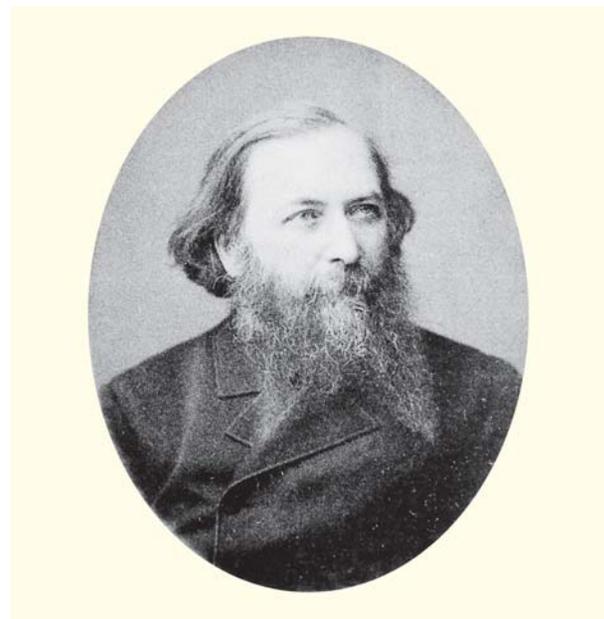
Один из листков с «Опытом системы элементов», отпечатанных в типографии и разосланных Менделеевым в феврале 1869 г. ряду отечественных химиков. Несколько аналогичных листков, но с заглавием на французском языке было, как предполагается, послано иностранным ученым. Однако списка этой «рассылки», преследовавшей главным образом приоритетные цели, не сохранилось.

сообщения об открытии периодического закона на предстоящем заседании РХО; просмотрел корректуру статьи; разослал листки с «Опытом системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве» (далее — сокращенно: «Опыт») многим отечественным и зарубежным химикам (сразу скажем, что реакции, естественно, никакой не последовало); написал предисловие к первой части «Основ химии» и 1 марта отправился на сыроварни. Меншуткин исполнил просьбу Менделеева и 6 марта сделал от его имени сообщение о периодическом законе на заседании РХО (реакции, естественно, никакой, если не считать сказанных позднее слов академика Н.Н.Зинина: «Дмитрий Иванович, пора заняться работать»).

Почему Менделеев не воспользовался случаем лично сообщить в РХО о своем открытии, а поручил это сделать Меншуткину? Допустим, тяга к артельным сыроварням оказалась непреодолимой. Но ведь можно было выступить по возвращении из Тверской губернии. Менделеев же, вернувшись из поездки 12 марта, спустя восемь дней выступает в Вольном экономическом обществе с докладом... об артельном сыроварении. 10 апреля он вновь выступает публично там же, на этот раз с сообщением о доходности молочного скотоводства и о результатах анализа почв с опытных полей. Создается впечатление, что сельскохозяйственные проблемы волновали его по крайней мере не меньше, чем химические. И это тоже представляется на первый взгляд странным. Но, если вдуматься, ничего удивительного здесь нет.

Создание «Опыта» стало началом той фазы работы Менделеева, когда он, убедившись, что «способ распределения элементов по их атомному весу не противоречит естественному сходству, существующему между элементами, а напротив того, прямо на него указывает» [1, с.18–20] и что в подмеченных им закономерностях «случайности допустить... невозможно» [7, с.619], уже мог сформулировать первые фундаментальные выводы, составившие ядро учения о периодичности, и предложить графическое (пока несовершенное) представление почти полной для того времени системы элементов. Но самая трудная часть работы была впереди, и на нее у Менделеева ушел год и девять месяцев.

«Опыт» определенно не удовлетворял ученого, поскольку был не «естественным», а компромиссным вариантом системы элементов. Не забывая Менделеев и о весьма прохладном отношении многих коллег-химиков к чисто теоретическим, в особенности к таксономическим работам. Учитывая эти обстоятельства, он не торопился выступать с докладом о своем открытии. Но и медлить с публикацией не мог — хотя бы потому, что вопросами систематики элементов занимались в то время многие. В сложившейся ситуа-



Николай Васильевич Верещагин (1839–1907), общественный деятель, зачинатель отечественного масло- и сыроделия.



Николай Александрович Меншуткин (1842–1907), русский химик, основные работы посвящены исследованию скоростей химических превращений органических соединений. Автор учебника «Аналитическая химия» (1871), выдержавшего 16 изданий (последнее — в 1931 г.).

ции Менделеев избрал единственно правильную тактику: поскольку доклад в РХО был нужен ему лишь для публикации статьи в «Журнале» Общества, его друг Меншуткин, отвечавший за издание «Журнала», был выбран им в качестве докладчи-

Естественная система элементов Д. Менделеева.

Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII (переход к I)	Группа IX	
R'O	R'O или RO	R'O	R'O или RO	RH'	R'O	R'O или RO	R'O или RO	HX	
H=1 H, O, H <sub>2</sub> O, HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Be=9, Al=13 Be, Al, B, C, Si, N, O, F, Ne	B=11 B, C, Si, N, O, F, Ne	C=12 C, Si, N, O, F, Ne	N=14 N, O, F, Ne	O=16 O, F, Ne	F=19 F, Ne	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63, Zn=65, Ga=70, Ge=72, As=75, Se=78, Br=80, Rb=85, Sr=87, Y=89, Zr=90, Nb=94, Mo=96, Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108, Cs=133, Ba=137, La=138, Ce=140, Pr=141, Nd=142, Sm=144, Eu=147, Gd=148, Tb=149, Dy=150, Ho=151, Er=152, Tm=153, Yb=154, Lu=157, Hf=180, Ta=182, W=184, Re=186, Os=193, Ir=195, Pt=197, Au=197, Hg=200, Tl=204, Pb=207, Bi=208, Th=231, Pa=231, U=240	Li=7, Na=23, K=39, Rb=85, Cs=133, Fr=100	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, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

Естественная система химических элементов Д.И.Менделеева (конец 1870 г.).

ка. Как заметил острый на язык и недолюбливавший Д.И.Менделеева В.В.Марковников (письмо А.М.Бутлерову от 31 октября 1867 г., т.е. периодический закон еще не открыт), «Менделеев... до такой степени привык царствовать в факультете, что не может равнодушно выслушивать каких бы то ни было возражений. Меншуткин у него не более как приказчик» [11, с.246].

Однако анализ архивных документов показал: уже в феврале 1869 г. Менделеев создал так называемую «короткую форму» системы, которая затем воплотилась в то, что он назвал «Естественной системой элементов» и опубликовал в феврале 1871 г. (датирована 29 ноября 1870 г., доложена на заседании РХО 3 декабря того же года). И впоследствии Дмитрий Иванович делал вид, что никакого «Опыта» не было. Почему же он сразу не предложил «короткую форму» системы?

Дело в том, что эта форма объединяет в одной группе элементы, которым отвечают абсолютно разные простые тела. А кроме того, их сходные по составу «низшие» соединения (т.е. соединения, в которых элементы находятся в низших степенях окисления) также заметно различаются по свойствам. Например, в 7-й группе оказываются столь непохожие элементы, как хлор и марганец, в 6-й — сера и хром и т.д. Да, они стоят в разных подгруппах (Менделеев не использовал понятия подгруппы, он делил каждый период на два ряда, и тогда, скажем, хлор и марганец оказывались в разных рядах — первый в нечетном, второй в четном), но, тем не менее, в одной группе. В чем их сходство? Оно проявляется только в высших соединениях. Например, высшая степень окисления и хлора, и марганца равна номеру группы (7), и соответствующие высшие соединения (Cl<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, KClO<sub>4</sub> и KMnO<sub>4</sub> и т.д.) проявляют сходные свойства. Менделеев об этом знал и до 1869 г. Более того,

об этом знали многие химики до него, но оставался вопрос: это сходство высших (скажем, кислородных) соединений обусловлено сходством самих элементов, оказавшихся в особом, «предельном» состоянии, или же в этих соединениях так много кислорода, что он нивелирует различия в природе самих элементов?

Только к концу 1869 г. или к началу 1870-го Дмитрий Иванович понял, что предельные (высшие) формы кислородных соединений и их свойства определяются не «самими свойствами кислорода» и наличием «границы O<sup>+</sup>» [10, с.246], т.е. особо устойчивой группировки из четырех кислородных атомов (например, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ~ H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>; HClO<sub>4</sub> ~ HMnO<sub>4</sub> и т.д.), но «состоянием», т.е., в конечном счете, природой элемента, образующего эти соединения. И пока Менделеев бился над этим вопросом, Лотар Мейер в марте 1870 г. в небольшой статье (датирована декабрем 1869 г.) публикует короткую форму Периодической системы (только повернутую по отношению к менделеевской на 90°). Замечу, что Мейер, создавая систему элементов, исходил из иных посылок, нежели Менделеев, что видно из первых строк статьи немецкого химика: «То, что пока еще не разложенные химические элементы абсолютно неразложимы, в настоящее время представляется по меньшей мере весьма неправдоподобным. Напротив, атомы элементов — это, по-видимому, отнюдь не последние (letzten), но лишь ближайшие составные части (die näheren Bestandtheile) молекул» [12, S.354]. Заметим, и Мейер, и Менделеев весьма скептически относились к атомной теории, но это не помешало им создать сходные системы элементов, опираясь на принятые тогда атомные веса. Но вернемся к нашему герою.

Итак, рассуждая фактически о структурных вопросах в неструктурных терминах, описывая разнообразие валентных возможностей элементов, кри-



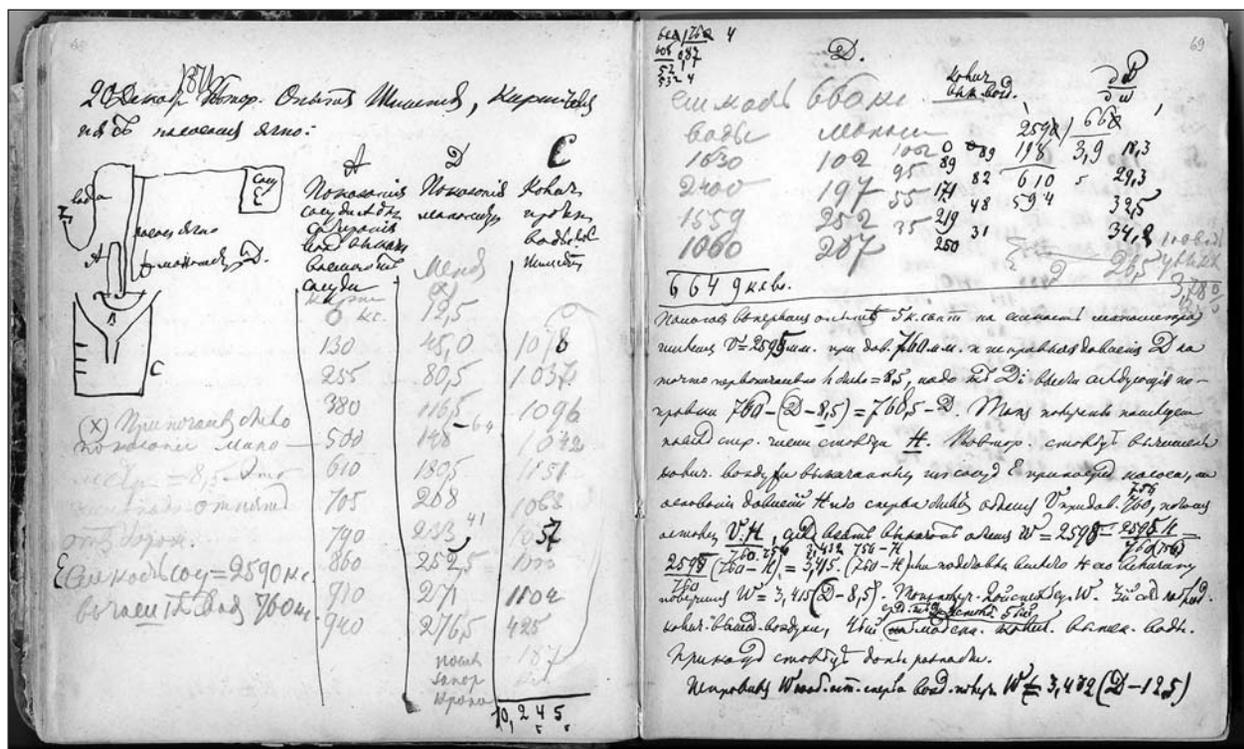
Юлиус Лотар Мейер (1830–1895), немецкий химик, иностранный член-корреспондент Петербургской академии наук с 1890 г. Между ним и Менделеевым в 1880 г. разгорелся приоритетный спор, в котором у каждой стороны были свои доводы, заслуживающие внимания. В 1882 г. Лондонское королевское общество присудило золотые медали Г.Дэви совместно Менделееву и Мейеру с формулировкой «За открытие периодических соотношений атомных весов». Менделеев на вручение не поехал, но прислал телеграмму с благодарностью, которая заканчивалась словами: «Да узнают будущие поколения русских своих Ньютонов, Дальтонов и Дэви!».

тикуя при этом саму концепцию валентности («атомности»), отказываясь от традиционных таксономических методов и приемов, Менделеев, идя сложным и противоречивым путем, сумел-таки прийти к естественной системе, которая не только позволяла объяснить уже известное, но и обладала мощным прогностическим потенциалом.

К ноябрю 1870 г. проблема построения естественной системы была решена. Это, разумеется, не означало, что серьезных трудностей не осталось (достаточно указать на вопрос о положении в системе редкоземельных элементов). Но главное было сделано.

### Вольный сын эфира

Теперь о третьей загадке в истории создания Периодической системы. Почему Менделеев с 1872 г. переключается на совершенно иную тематику, не связанную, казалось бы, с периодическим законом? Действительно, 20 декабря 1871 г. в его рабочем дневнике появляется неожиданная запись: «Опыт. Шмидт, Кирпичев и я с насосом Ягно» [13]. Зачем Менделееву понадобились насосы? Он же открыл периодический закон, который содержал в себе колоссальный тематический ресурс для дальнейших исследований! Пожалуй, почти любой исследователь на его месте всю оставшуюся жизнь посвятил бы главным образом (если не исключительно) совершенствованию форм системы, поискам новых корреляций между разнообразными



Фрагмент лабораторной тетради Д.И.Менделеева с первой записью, свидетельствующей о начатых им с помощниками исследованиях газов.



Двухъярусные весы для взвешивания газов конструкции Менделеева.

формами и состояниями простых тел и соединений в свете учения о периодичности и тому подобным вопросам, т.е. просеиванию сквозь сито этого учения всех крупных и мелких фактов и корри. Таков был бы путь естествоиспытателя, *специалиста-химика*. Однако Менделеев, будучи по характеру и разнообразию своих интересов, стилю работы,

мегаломании в постановке задач и пророческим наклонностям скорее *натурфилософом*, нежели *ученым (scientist)*, пошел по иному пути.

Периодический закон таил в себе много загадок, «не поддающихся рациональной концепции». Одна из самых глубоких касалась физических причин явления периодичности. Поскольку свойства элементов находились в периодической зависимости от их атомных весов, то, как полагал Менделеев, объяснение природы периодичности «возможно только в смысле динамического представления, могущего и долженствующего прежде всего разъяснить самое понятие о весе». Отсюда его интерес к вопросу о «причине веса и притяжения» [8, с.805], а также к свойствам среды, передающей свет и тяготение, т.е. к мировому эфиру. Он был глубоко убежден в том, что «объяснить и выразить периодический закон — значит объяснить и выразить причину закона кратных отношений, различия элементов и их атомности и в то же время понять, что такое масса и тяготение» [7, с.617] Более того, изучение природы мирового эфира открывало путь к постижению природы электрических и магнитных явлений, гравитации и химического сродства, т.е. вело к разгадке самых глубоких мировых тайн, и на этом фоне открытие периодического закона представлялось Дмитрию Ивановичу лишь ступенью (возможно, не самой крутой) в реализации его великого замысла.

По мнению Менделеева, одним из способов доказательства существования эфира могло быть исследование сильно разреженных газов, ибо в этих условиях свойства «обычного» вещества перестали бы маскировать свойства эфира.

Уже с 70-х годов, — вспоминал Менделеев, — «у меня назойливо засел вопрос: да что же такое эфир в химическом смысле? Он тесно связан с периодической системой элементов, ею и возбудился во мне»\* [14, с.474]. На личном экземпляре «Естественной системы» (оттиск из второй части первого издания «Основ», 1871 г.) около символа водорода Менделеев делает запись: «Легче всех эфир, в миллионы раз».

Исследования по газам субсидировались Императорским Русским техническим обществом (РТО), благодаря чему у Менделеева появилась уникальная возможность реализовать широко задуманную экспериментальную программу. Однако этот цикл его работ не дал сколько-нибудь значимых результатов, хотя ученый и обещал поклониться в пояс тому, кто сделал бы больше.

Предложенное Менделеевым уравнение состояния идеального газа, которое, по уверениям авто-

*Личный экземпляр Менделеева*

Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV
R'O	R'O <sup>2</sup> или RO	R'O <sup>3</sup>	R'O <sup>4</sup> или RO <sup>2</sup>
H=1 H <sup>2</sup> O, NH <sub>3</sub> , HCl, H <sup>2</sup> N, H <sup>2</sup> C, ROH.			RH <sup>4</sup>
Литий Li=7 LiCl, LiOH, Li <sub>2</sub> O, LiX, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Берил Be=9,4 BeCl <sub>2</sub> , BeO, Be <sup>2</sup> Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Ванadium B=11 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , B <sup>2</sup> N <sub>3</sub> , B <sup>2</sup> Na <sup>2</sup> O <sup>2</sup> , B <sup>2</sup> F <sub>3</sub>	Углерод C=12 CH <sub>4</sub> , C <sup>2</sup> H <sub>2</sub> , C <sup>2</sup> N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , C <sup>2</sup> O <sub>2</sub>
Натрий 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>	Магний Mg=24 MgCl <sub>2</sub> , MgO, MgCO <sub>3</sub> , MgSO <sub>4</sub> , Mg <sup>2</sup> NH <sup>2</sup> PO <sub>4</sub>	Алюминий Al=27,3 Al <sup>3</sup> Cl <sub>3</sub> , Al <sup>3</sup> O <sub>3</sub> , KAIS <sup>3</sup> O <sub>3</sub> , KAIS <sup>3</sup> O <sub>2</sub>	Кремний Si=28 SiH <sub>4</sub> , SiCl <sub>4</sub> , SiH <sub>2</sub> Fe, KAIS <sup>3</sup> O <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>
Калий K=39 KCl, KOH, K <sup>2</sup> O, KNO <sub>3</sub> , K <sup>2</sup> CO <sub>3</sub> , R <sup>2</sup> Cl <sub>2</sub> , R <sup>2</sup> SiF <sub>2</sub>	Кальций Ca=40 CaCl <sub>2</sub> , CaO, CaSO <sub>4</sub> , CaCl <sub>2</sub> CaO, CaCO <sub>3</sub>	Железо Fe=55,8 FeCl <sub>2</sub> , FeO, ZnCO <sub>2</sub> , ZnSO <sub>4</sub> , ZnEt <sub>2</sub>	Титан Ti=48 (50?) TiCl <sub>4</sub> , TiO <sub>2</sub> , FeTiO <sub>2</sub> , FeTiO <sub>2</sub>
Рубидий Rb=85 RbCl, RbOH, Rb <sup>2</sup> Cl <sub>2</sub>	Стронций Sr=87 SrCl <sub>2</sub> , SrO, SrH <sup>2</sup> O <sub>2</sub> , SrSO <sub>4</sub> , SrCO <sub>2</sub>	Цинк Zn=65 ZnCl <sub>2</sub> , ZnO, ZnCO <sub>2</sub> , ZnSO <sub>4</sub> , ZnEt <sub>2</sub>	Ниобий Nb=90 ZrCl <sub>2</sub> ZrO <sub>2</sub> ZrX <sup>4</sup> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Серебро Ag=108 AgX, AgCl	Кадмий Cd=112 CdCl <sub>2</sub> , CdO, CdS, CdSO <sub>4</sub>	Индий In=113 InCl <sub>3</sub> , In <sup>2</sup> O <sub>3</sub>	Сурьма Sb=118 SbCl <sub>3</sub> , SbCl <sub>5</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , Sb <sub>2</sub> X <sup>4</sup>
Цезий Cs=133 CsCl, CsOH, Cs <sup>2</sup> Cl <sub>2</sub>	Барий Ba=137 BaCl <sub>2</sub> , BaH <sup>2</sup> O, BaO, BaSO <sub>4</sub> , BaSiF <sub>6</sub>	Лантан La=139 La <sup>3</sup> Cl <sub>3</sub> , La <sup>3</sup> O <sub>3</sub> , La <sup>3</sup> OH <sub>3</sub>	Селен Se=140 (138) SeCl <sub>2</sub> , SeO <sub>2</sub> , SeO <sub>3</sub> , SeX <sup>4</sup>
153	158		
175	177		
Ау=197 AuX, AuX <sup>2</sup>	Ртуть Hg=200 HgCl <sub>2</sub> , HgO, Hg <sup>2</sup> Cl <sub>2</sub> , Hg <sup>2</sup> O, Hg <sub>2</sub> O, HgX <sup>2</sup> , HgX <sup>4</sup>	Телур Te=204 TeCl <sub>4</sub> , TeO <sub>2</sub> , Te <sup>2</sup> O <sub>3</sub> , Te <sup>2</sup> SO <sub>4</sub>	Свинец Pb=207 PbCl <sub>2</sub> , PbO, Pb <sup>2</sup> O, Pb <sup>2</sup> SO <sub>4</sub> , Pb <sup>2</sup> X <sup>4</sup> , Pb <sup>2</sup> X <sup>6</sup>
220	225	227	231 ThCl <sub>4</sub> , ThO <sub>2</sub> , ThX <sub>4</sub> , ThSO <sub>4</sub>

*Личный экземпляр Менделеева*

Фрагмент личного экземпляра Менделеева «Естественной системы химических элементов» с его пометками. В левом верхнем углу перед символом водорода сделана запись о мировом эфире.

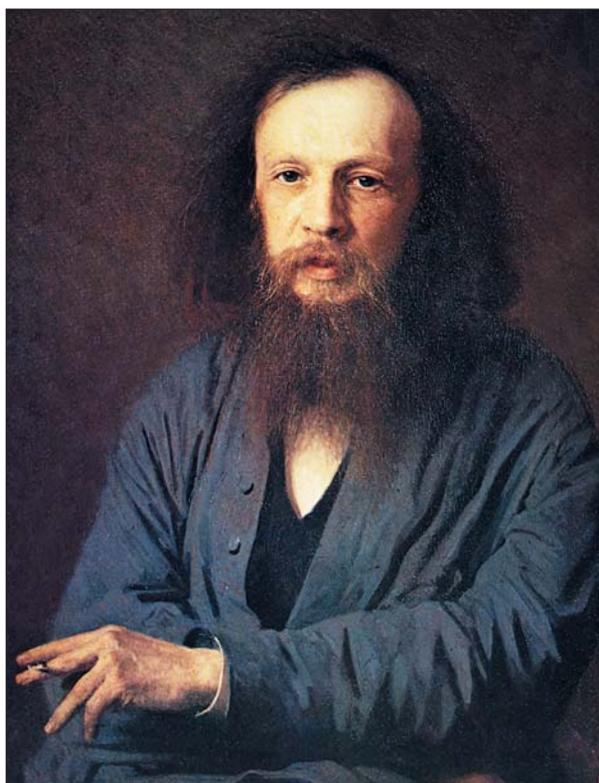
\* Тут Дмитрий Иванович либо запямятовал, либо лукавил. Загадка мирового эфира занимала его еще в студенческие годы. Другое дело, что открытие периодического закона усилило его интерес к этой теме.

ров «Летописи», является «основным результатом [его] работы... в области физики газов» [15, с.179], к тому времени (1874–1875) уже использовалось в литературе, а потому его выведение Менделеевым могло иметь лишь методическое значение.

Наконец — и это главное — так называемые положительные отступления от закона Бойля–Мариотта при очень низких давлениях, которым Менделеев придавал особое значение, впоследствии не подтвердились.

Кроме того, его работе препятствовали многие обстоятельства «во внешней обстановке дела»: загруженность другими занятиями (преподавание в университете, напряженный труд по выпуску второго и третьего изданий «Основ химии», изучение «нефтяных дел», ведение сельскохозяйственных опытов и т. д.), смерть в 1875 г. М.Л.Кирпичева, уход в 1877 г. других ассистентов, заболевание плевритом, неизбрание в Академию наук, наконец, семейная драма (развод с первой женой и второй брак). Все эти обстоятельства привели в итоге Дмитрия Ивановича на рубеже 1870–1880-х годов к тяжелому психологическому кризису.

Но если ограничиться чисто научной стороной ситуации, то следует сказать, что провал широко задуманной исследовательской программы по физике газов стал для Менделеева сильным ударом. Положение усугублялось тем, что в эти годы физическая химия, к которой он с молодости питал особый интерес, заметно изменила свой характер. Внимание ученых сконцентрировалось на таких вопросах, как электропроводность и ионные равновесия в растворах, скорость диффузии ионов, электродные потенциалы, химическая кинетика и т.д. В физико-химических работах все шире использовались термодинамические методы, аппарат теории дифференциальных уравнений и т.п. Серьезные изменения намечались и в физике. Все это в целом было непривычно, а подчас и чуждо Менделееву. И более всего ему были чужды даже не отдельные идеи и теории (многие из которых он критиковал вполне заслуженно), а сам стиль и строй физико-химических работ новой волны. В результате он оказался в оппозиции по отношению к многим крупным открытиям в естествознании второй половины XIX в. Открыв периодический закон и встав в конце 1871 г. перед выбором — заняться далее «химической стороной дела» (к примеру, кропотливыми аналитическими исследованиями редкоземельных элементов, которые он начал было проводить с декабря 1870 г.) или же обратиться к поискам физических причин периодичности, — Менделеев, последний великий натурфилософ 19-го столетия, пошел по второму пути, оказавшемуся тупиковым. Триумф Периодической системы стал прологом трагического одиночества ее создателя: «я опять очутился один» [16, с.188].



Портрет Менделеева кисти И.Н.Крамского (1878). Художник очень точно передал психологическое состояние своего героя, для которого конец 1870-х — начало 1880-х годов стало временем глубокого душевного кризиса.

### И одна легенда...

Коллега и друг Д.И.Менделеева, выдающийся русский геолог А.А.Иностранцев (1843–1919), в своих «Воспоминаниях» приводит такой эпизод: «Как-то я зашел к нему [Менделееву] по какому-то делу и застал его в превосходном настроении; он даже шутил, что было крайней редкостью. Это было вскоре после его знаменитого открытия закона периодичности элементов. Я, воспользовавшись этим благодушным настроением Д.И., обратился к нему с вопросом, что натолкнуло его на знаменитое открытие, на что он сообщил, что уже давно подзревал известную связь элементов между собой и что много и долго думал об этом. В течение последних месяцев Д.И. перепортил массу бумаги с целью отыскать в виде таблицы эту закономерность, но ничего не удавалось. В последнее время он усиленно снова занялся этим вопросом и, по его рассказу, был даже близок к этому, но окончательно все-таки ничего не выходило. Перед самым открытием закона Д.И. провозился над искомою таблицей целую ночь до утра, но в ночь ничего не вышло, он с досады бросил работу и, томимый желанием выспаться, тут же в рабочем кабинете, не раздеваясь, повалился на диван и крепко заснул. Во сне он увидел вполне ясно ту таблицу, которая позднее была напечатана. Даже во сне радость его



Александр Александрович Иностранцев (1843–1919), выдающийся русский геолог, профессор Санкт-Петербургского университета, член-корреспондент Петербургской Академии наук (с 1901 г.).

Li = 7	Na = 23	Ca = 40	Sr = 87	Ba = 137	
	F = 19	K = 39	Rb = 85	Cs = 133	
	O = 16	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
	N = 14	S = 32	Se = 79	Te = 128	
	C = 12	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210
		Si = 28	—	Sn = 118	

Фрагмент промежуточного варианта «Опыта системы элементов», создав который, Менделеев смог перейти к его окончательному варианту.

была настолько сильна, что он сейчас же проснулся и быстро набросал эту таблицу на первом клочке бумаги, валявшемся на его конторке» [17, с.144].

Почему этот рассказ Иностранцева вызывает сомнения? Во-первых, мемуарист работал над своими воспоминаниями в 1919 г., на 76-м году жизни, т. е. спустя полвека после описываемых им событий. Во-вторых, и это более важно, Менделеев, любивший рассказывать окружающим различные забавные и поучительные истории из своей жизни (были и небылицы), ни разу не упоминал об этом чудесном сне. В-третьих, дошедшие до нас наброски будущей системы элементов не позволяют выявить эффект внезапного озарения. На самом трудном, пиковом этапе создания «Опыта», когда Менделеев коренным образом изменил сам принцип построения системы элементов (суть закона — периодический характер изменения свойств элементов по мере возрастания их весов — к этому времени уже была ему ясна, и речь шла об адекватном графическом представлении идеи периодичности), ученый создал *промежуточный* вариант системы, от которого отталкивался в последующей работе и который в главной своей части практически совпал с таблицей Л. Мейера, впервые опубликованной в 1864 г. в монографии [18, S.137], переведенной на русский язык в 1866 г.

Есть еще один момент, связанный с рассказом Иностранцева и вызывающий вопросы: о массе «перепорченной бумаги». Менделеев имел привычку хранить все, что написал, каждую мелочь, и свой архив он систематизировал сам. Но почему-то из всего, что имело отношение к истории создания «Опыта», им было сохранено только пять рукописных листков.

Разумеется, число загадок, связанных с открытием и сущностью периодического закона, много больше, но рассказ о них выходит за рамки журнальной публикации. ■

	4 werthig	3 werthig	2 werthig	1 werthig	1 werthig	2 werthig
	—	—	—	—	Li = 7.03	(Be = 9.3?)
Differenz =	—	—	—	—	16.02	(14.7)
	C = 12.0	N = 14.04	O = 16.0	F = 19.0	Na = 23.05	Mg = 24.0
Differenz =	16.05	16.96	16.07	16.46	16.08	16.0
	Si = 28.5	P = 31.0	S = 32.07	Cl = 35.46	K = 39.13	Ca = 40.0
Differenz =	(89.1/2) = 44.55	44.0	46.7	44.51	46.3	47.6
	—	As = 75.0	Se = 78.8	Br = 79.97	Rb = 85.4	Sr = 87.6
Differenz =	(89.1/2) = 44.55	45.6	49.5	46.8	47.6	49.5
	Sn = 117.6	Sb = 120.6	Te = 128.3	I = 126.8	Cs = 133.0	Ba = 137.1
Differenz =	89.4 = 2·44.7	87.4 = 2·43.7	—	—	(71 = 2·35.5)	—
	Pb = 207.0	Bi = 208.0	—	—	(Tl = 204?)	—

Вариант таблицы химических элементов Л.Мейера (1864).

## Литература / References

1. Менделеев Д.И. Периодический закон. Основные статьи. Редакция, статьи и примечания Б.М.Кедрова. М., 1958. [*Mendeleev D.I. Periodic Law. Main Papers. B.M.Kedrov (ed.). Moscow, 1958. (In Russ.)*.]
2. Newlands J. The Law of Octaves, and the Causes of the Numerical Relations among the Atomic Weights. *Chemical News*. 1866; 13: 113.
3. Менделеев Д.И. Органическая химия. Менделеев Д.И. Соч. Т.8. Л.; М., 1948; 35–602. [*Mendeleev D.I. Organic chemistry. Mendeleev D.I. V.8. Leningrad; Moscow, 1948; 35–602. (In Russ.)*.]
4. Менделеев Д.И. Лекции по общей химии. Менделеев Д.И. Соч.: В 25 т. Л.; М. (1934–1954). 1949; 15: С.357–439. [*Mendeleev D.I. Lectures in the general chemistry. Mendeleev D.I. Works: in 25 volumes. Leningrad; Moscow (1934–1954). 1949; 15: 357–439. (In Russ.)*.]
5. Менделеев Д.И. Избранные лекции по химии. М., 1968. [*Mendeleev D.I. Selected lectures in chemistry. Moscow. 1968. (In Russ.)*.]
6. Менделеев Д.И. Периодическая законность химических элементов (1871). Менделеев Д.И. Периодический закон. Основные статьи. Ред. Б.М. Кедров. М., 1958; 102–176. [*Mendeleev D.I. Periodic Law of the Chemical Elements (1871). Mendeleev D.I. Periodic Law. Main Papers. B.M.Kedrov (ed.). Moscow, 1958; 102–176. (In Russ.)*.]
7. Менделеев Д.И. Основы химии. СПб., 1906. [*Mendeleev D.I. Principles of Chemistry. St.Petersburg, 1906. (In Russ.)*.]
8. Менделеев Д.И. Основы химии. Часть II. Менделеев Д.И. Соч.: В 25 т. Л.–М. (1934 – 1954). 1949; 14. [*Mendeleev D.I. Principles of Chemistry. Part II (1st edn.). Mendeleev D.I. Works: in 25 volumes. Leningrad–Moscow. (1934–1954). 1949; 14. (In Russ.)*.]
9. Менделеев Д.И. Периодический закон. Дополнительные материалы. Ред. Б.М.Кедров. М., 1960. [*Mendeleev D.I. Periodic Law. Supplements. B.M.Kedrov (ed.). Moscow, 1960. (In Russ.)*.]
10. Менделеев Д.И. Периодическая законность химических элементов (1898). Менделеев Д.И. Периодический закон. Основные статьи. Ред. Б.М.Кедров. М., 1958; 237–273. [*Mendeleev D.I. Periodic Law of the Chemical Elements (1871). Mendeleev D.I. Periodic Law. Main Papers. B.M.Kedrov (ed.). Moscow, 1958; 237–273. (In Russ.)*.]
11. Научное наследство. Естественнонаучная серия. Т.4. Письма русских химиков к А.М.Бутлерову. М., 1961. [Scientific legacy. Natural Science Series. V.4. Letters of Russian chemists to A.M.Butlerov. Moscow, 1961. (In Russ.)]
12. Meyer L. Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte. *Annalen der Chemie und Pharmacie*. VII. Supplementband. 1870. S.354–364.
13. Научный архив Менделеева, СПбГУ. I-B-23-I-62, 68 [Mendeleev scientific Archive, SPb St. University.]
14. Менделеев Д.И. Попытка химического понимания мирового эфира. Менделеев Д.И. Периодический закон. Основные статьи. Ред. Б.М.Кедров. М., 1958; 470–517. [*Mendeleev D.I. An attempt towards a chemical Conception of the Ether. Mendeleev D.I. Periodic Law. Main Papers. B.M.Kedrov (ed.). М., 1958; 470–517. (In Russ.)*.]
15. Добротин Р.Б., Карпило Н.Г., Керова Л.С., Трифонов Д.Н. Летопись жизни и деятельности Д.И. Менделеева. Отв. ред. А.В.Сторонкин. Л., 1984. [*Dobrotin R.B., Karpilo N.G., Kerova L.S., Trifonov D.N. Chronicle of the life and work of D.I.Mendeleev. A.V.Storonkin (ed.). Leningrad, 1984. (In Russ.)*.]
16. Тищенко В.Е., Младенцев М.Н. Дмитрий Иванович Менделеев, его жизнь и деятельность. Университетский период, 1861–1890 гг. Отв. ред. Ю.И.Соловьев. М., 1993. [*Tishchenko V.E., Mladentsev M.N. Dmitri Ivanovich Mendeleev, his life and work. University period, 1861–1890. Yu.I.Solovyov (ed.). Moscow, 1993. (In Russ.)*.]
17. Иностранцев А.А. Воспоминания. Подготовка текста, вступительная статья и комментарии В.А.Прозоровского и И.Л.Тихонова. СПб., 1998 [Inostrantsev A.A. Memoirs. Edited by V.A.Prozorovsky and I.L.Tikhonov. St.Petersburg, 1998. (In Russ.)]
18. Meyer L. Die Modernen Theorien der Chemie und Ihre Bedeutung für die chemische Statik. Breslau, 1864.

## The Discovery of the Periodic Law: Three Puzzles and a Legend

I.S.Dmitriev

Mendeleev Museum and Archives, Saint-Petersburg State University (Saint-Petersburg, Russia)

The history of the Periodic Law discovery is complex and contains many unexpected twists and turns as well as puzzles. The article discusses three of them. How did Mendeleev, who was extremely skeptical about atomic theory, create the Periodic Table of Elements? Why did not Mendeleev rush to report personally his discovery to the Russian scientific community and asked his colleague and friend N. Menshutkin to make the first report about his discovery? Why did Mendeleev dramatically change the scope of his research a year and nine months after the discovery of the Periodic Law? In addition, the article presents arguments against the widespread legend that the Periodic Table appeared to Mendeleev in a dream.

**Keywords:** D.I.Mendeleev, L.Meyer, N.A.Menshutkin, Periodic Law, universal ether.

# Метан в Черном море

А.Ю.Леин

Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (Москва, Россия)

В статье в сжатой форме рассмотрены закономерности распределения на дне Черного моря фокусированных выходов метана в составе газопузырьковых струй: сипов, грязевых вулканов и залежей газгидратов в тектонически и морфологически нарушенных участках дна.

**Ключевые слова:** метан, Черное море, сипы, грязевые вулканы, газгидраты.

В 60-е годы XX в. были сделаны грандиозные открытия в Мировом океане: установлена и изучена система срединно-океанических хребтов, оконтурены огромные по площади поля Fe-Mn-конкреций, найдены сульфидные рудопоявления и залежи, обнаружен второй, помимо фотосинтеза, источник жизни на Земле — микробный хемосинтез. На дне морей выявлены грязевые вулканы, газгидраты метана, карбонатные постройки и наиболее доступные для исследования пузырьковые выходы метана со дна — холодные метановые сипы, представляющие собой фокусированные потоки метаносодержащих флюидов. Эти потоки — часть планетарной системы дефлюидизации недр Земли и важное звено в процессах взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Следует подчеркнуть отчетливую сопряженность в океане, особенно в Черном море, биогеохимических процессов циклов серы (сульфатный океан) и углерода [1, 2].

Я решила ограничиться кратким обзором источников метана в Черном море\* в связи с выходом с 2009 по 2013 г. трех монографий, посвященных результатам многолетнего изучения сипов [3], анализу грязевого газового вулканизма [4] и биогеохимическому циклу метана в Черном море [5].

## Метановые сипы

Схема размещения метановых сипов в Черном море приведена ниже. Они чаще всего действуют в пульсационном (гейзерном) режиме, исчезая и появляясь вновь рядом или на том же месте.

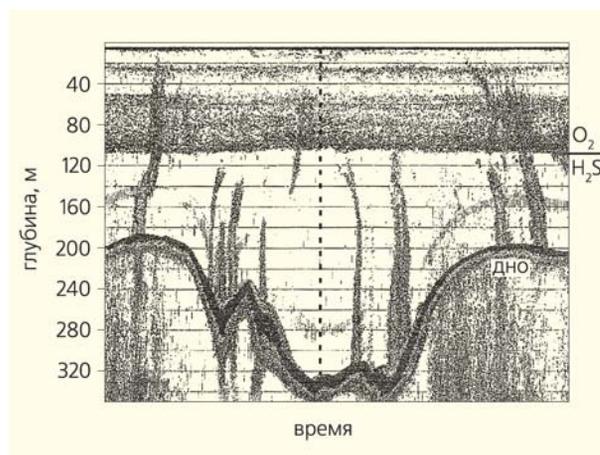
\* См.: Леин А.Ю., Иванов М.В. Крупнейший на Земле метановый водоём // Природа. 2005. №2. С. 19–25.



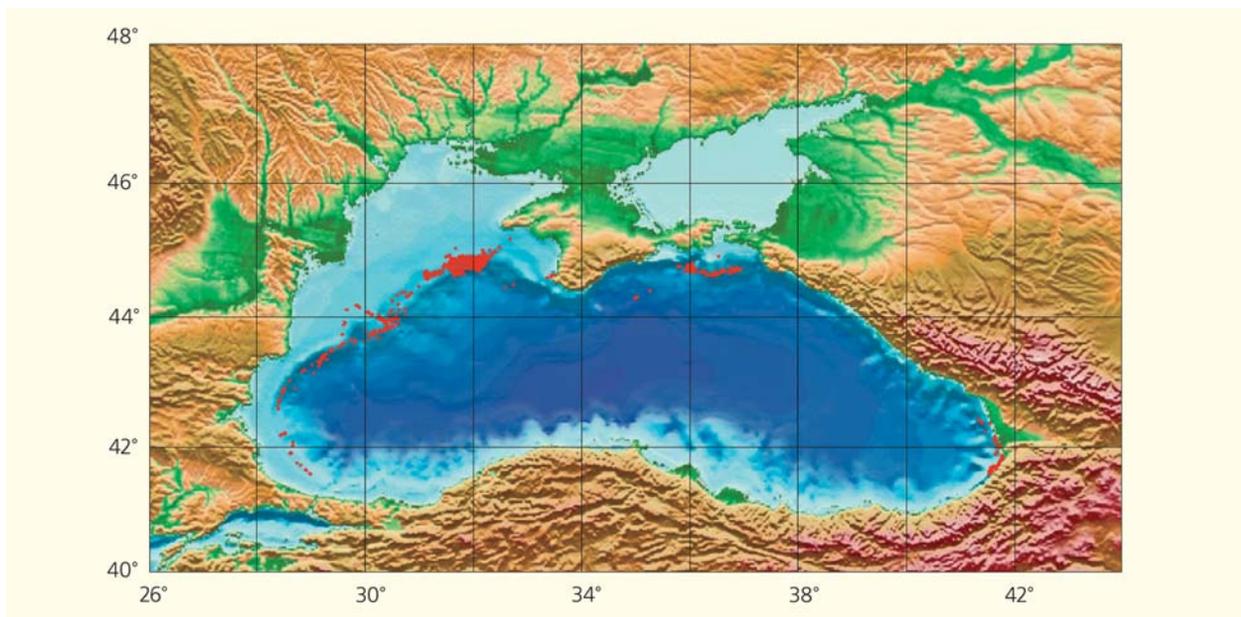
**Алла Юльевна Леин**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН. Неоднократно спускалась в подводных аппаратах «Мир» в глубины океана. Область научных интересов — глобальные биогеохимические циклы серы и углерода. Лауреат премии Правительства РФ (2012). Член редколлегии журнала «Природа». e-mail: lein@ocean.ru

Эфемерность пузырьковых потоков метана «компенсируется» образованием долгоживущих карбонатных построек, корок, конкреций, сплошных линзовидных тел, состоящих из Mn-кальцита, арагонита, реже доломита и других карбонатных минералов в ассоциации с сульфидными (пирит и другие производные  $H_2S$ ) и сульфатными (гипс, минералы Ba и Sr и др.) образованиями.

Изложенные представления частично уже были известны в 1989 г., к началу изучения холодных сипов в Черном море сотрудниками Института био-



Эзограммы метановых сипов в Днепровском каньоне [3].



Распределение струйных метановых газовыделений (показано красным) в Черном море [3].

логии южных морей (ИнБЮМ, г. Севастополь), которые привлекли к этим исследованиям московскую группу микробиологов из Института микробиологии РАН (ИНМИ РАН) [6, 7].

С 1989 г. было проведено 23 рейса в Черное море на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Водяницкий» по научным планам ИнБЮМ, связанным с циклом метана, и по Международным проектам Европейского сообщества: MEGASEEBS (Methane Gas Seep Explorations in the Black Sea, 1993–1994), EROS (European Research Open System, 1995, 1997), Big-Black (1999), Crimea (2003), а также на НИС «Профессор Логачев» по проекту GOSTDABS [8] с неременным участием московских микробиологов.

Детальнее других полей метановых сипов в Черном море изучены высачивания в палеодельте р. Днепра, где закартировано 2650 локаль-

ных участков выхода струйных пузырьков газа на глубинах 35–835 м. Помимо палеодельты метановая дегазация наблюдалась на кромке шельфа, на свале глубин и в других геодинамических структурах. Важно отметить, что достигать поверхности моря могут только газовые факелы с глубин менее 250 м [3].

В районах сиповых полей даже в аэробной зоне осадки — восстановленные ( $Eh = -100 - -200$  мВ). С помощью радиоизотопного метода в придонной воде и в осадках зафиксированы активные процессы сульфатредукции [9, 10] и метаногенеза [11], а также процессы формирования сложнопостроенных микробных матов и аутигенных (образованных на месте) минералов.

Экстремально изотопнолегкий углерод аутигенных карбонатов в микробных матах однозначно говорит о его метановом генезисе.



Поле карбонатных построек в глубоководной (730 м) части палеорусл Днепра [3].

### Грязевой вулканизм

Помимо холодных метановых сипов на дне Черного моря обнаружены многочисленные грязевые вулканы, с деятельностью которых связаны потоки  $\text{CH}_4$  со дна. Считается, что именно к грязевым вулканам приурочен основной поток флюидов из недр ко дну Черного моря [4, 12].

Грязевые вулканы хорошо выделяются на сейсмических профилях. Они представляют собой конусовидные постройки высотой от 60 до 120 м и диаметром у основания от 1 до 2.5 км.

Область массового развития глубоководных грязевых вулканов занимает площадь ~10 тыс. км<sup>2</sup>, мощность осадочного чехла на которой достигает 15 км. Еще один район грязевого вулканизма протяженностью ~70 км находится в прогибе Сорокина, в нижней части континентального склона и континентального подножия, к юго-востоку от Крымского п-ова.

Нам довелось посетить район подводного вулкана Двуреченский, который имеет округлую форму с плоским сводом. Диаметр постройки около 1 км. В 2002 и 2003 гг. на нем наблюдался фонтан пузырькового метана высотой ~800 м, хотя с таких

(>2000 м) глубин выходы сипового метана представляют большую редкость [3, 4].

Флюиды холодных сипов поступают за счет уплотнения осадочных отложений, дегидратации глинистых минералов и при процессах, связанных с образованием газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ).

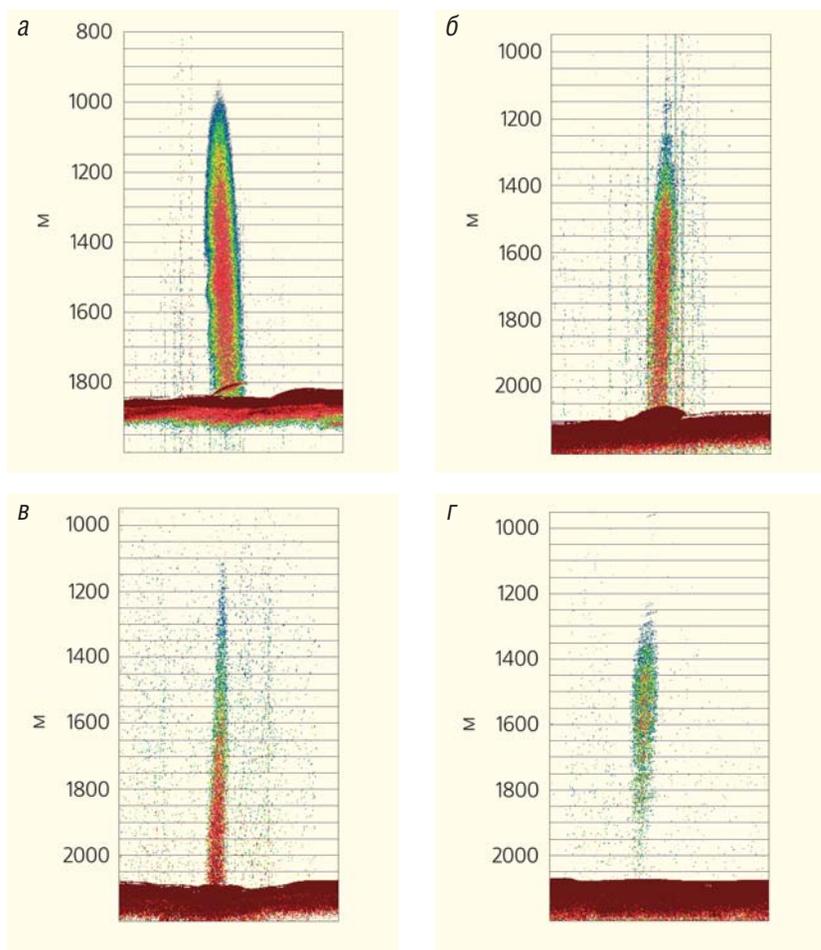
В продуктах извержения глубоководных грязевых вулканов содержатся повышенные концентрации сероводорода и метана, поступающих из верхней толщи глубоководных осадочных бассейнов, в том числе из зон сульфатредукции и метаногенеза. Изотопные и геохимические (присутствие тяжелых гомологов метана) данные показали, что во флюидных потоках метан полигенный: термогенный (катагенетический) и биогенный (диагенетический). Последний заимствуется по пути движения глубинных флюидов из осадочных толщ, нарушенных при тектонических, оползневых и других явлениях.

Присутствие сероводорода в составе черноморских сипов и в грязевулканических извержениях позволяет считать такие потоки  $\text{H}_2\text{S}$  участниками формирования сероводородного потенциала Черного моря. На сегодняшний день количество этого

потока определить не удается. Скорее всего, данный сероводород входит в те 20% газа, растворенного в водной толще глубоководной зоны Черного моря, которые не вошли в расчет микробного  $\text{H}_2\text{S}$  (80%), образованного *in situ* в водной толще.

Трудности, связанные с отбором флюидов сипов и грязевых вулканов для генетического анализа и определения возраста метана, в известной степени компенсируются возможностью изучения аутигенных карбонатных минералов (methane-derived). В Черном море первые данные по составу, возрасту и изотопному составу ( $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{C}_{\text{карб}}$ ) карбонатов мы получили в совместных экспедициях с сотрудниками ИнБЮМ [11]. Впоследствии изучением подобных карбонатов в Черном море занимались многие отечественные и зарубежные исследователи. Только на северо-западе Черного моря обнаружены тысячи карбонатных построек в местах выхода газа на поверхность дна.

Мы изучали карбонатные постройки, собранные подводным аппаратом «Бентос» с глу-



Эхограммы газовых факелов в Черном море: а — сип Егорова, б–г — над вулканом Двуреченский [3].

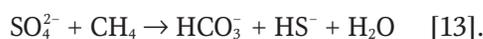
бины 239 и 176 м на границе шельфа и континентального склона [7]. Газовая струя, которая содержала 80 об. %  $\text{CH}_4$ , поднималась из кораллоподобной постройки высотой 80 см, сложенной арагонитом и кальцитом. Экстремально легкие значения  $\delta$  карбонатного ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}} = -32.5 - -40.4$ ) и органического ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} = -75.6 - -83.8$ ) углерода однозначно свидетельствовали об их образовании за счет окисления метана газовых струй. Это были первые исследования генезиса карбонатов и микробных матов на сиповых полях в Черном море. Возраст  $\text{C}_{\text{карб}}$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$  по  $^{14}\text{C}$  (данные В.И.Купцова, Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН) колебался от 3 до 5.5 тыс. лет [11].

Более детальные исследования экосистемы сипов и кораллоподобных карбонатов были проведены в пробах, отобранных с помощью подводного аппарата «Jago» в совместной украинско-российско-немецкой экспедиции на НИС «Профессор Логачев» в июне—июле 2001 г. под руководством профессора Гамбургского университета В.Михаелиса [8, 10].

В аэробной зоне моря, на глубинах 60–200 м, также были обнаружены карбонатные корки и плиты толщиной до 30 см. В них присутствуют раковины моллюсков *Mutilus galloprovincialis* и *Modiola phassiolina*, сцементированные тонкодисперсным карбонатным материалом светло-серого цвета. В карбонатах встречалось и битуминозное органическое вещество. В пористой карбонатной матрице наблюдались многочисленные включения, состоящие из сноповидных и радиально-лучистых агрегатов кристаллических арагонита и кальцита [10].

В анаэробной зоне, на глубинах 200–750 м, пузырьки метана поступали из конусообразных и кораллоподобных карбонатных построек высотой до 4 м (палеодельта Днестра, наблюдения с подводного обитаемого аппарата «Jago»). Постройки были пронизаны микробными образованиями, как правило, розового цвета. Значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  микробных матов, колеблющиеся от  $-40$  до  $-80$ , свидетельствуют о значительных масштабах фракционирования в процессе микробного окисления  $\text{CH}_4$ , с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$ .

Формирование карбонатных минералов в анаэробной зоне Черного моря происходит при окислении  $\text{CH}_4$  консорциумом архей и сульфатредуцирующих микроорганизмов по формуле:



Все карбонатные постройки из анаэробной зоны Черного моря покрыты черным налетом мета-

стабильных сульфидов железа, условно — гидротроилитом ( $\text{FeS}_{n-1}$ ).

В составе аутигенных карбонатов обычно присутствуют изоморфные примеси Ba и Sr, характерные и для нормально осадочных (седиментационных) карбонатов.

### Газгидраты метана

В Черном море газгидраты  $\text{CH}_4$  впервые были обнаружены в 1972 г. [14]. Для осадочного бассейна этого моря характерна мощная толща молодых отложений, глиняный диапиризм и активная грязевулканическая деятельность. Гидратообразование здесь происходит за счет фильтрации воды и миграции газа из глубоких углеводородсодержащих отложений в зону стабильности газовых гидратов. Накапливаются они, как правило, вблизи дна.

Геотермический режим очагов разгрузки отличается высокими значениями теплового потока ( $150\text{--}200 \text{ мВ}\cdot\text{м}^{-2}$ ) [15]. Единица объема гидрата метана содержит до 164 объемов газа при атмосферном давлении и температуре воздуха выше  $0^\circ\text{C}$ .

Принято считать газгидраты нетрадиционным потенциальным источником энергии. По разным оценкам, прогнозные запасы газа в гидратах Черного моря составляют от 20 до 49 трлн  $\text{м}^3$  [3].

Скопления газгидратов практически всегда связаны с зонами разломов, конусами выноса рек и областями грязевого вулканизма. Нам удалось встретить газгидраты в виде мелких ( $1\text{--}1.5 \text{ мм}$ ) прозрачных зерен, быстро тающих при просмотре под биноклем. Мы нашли газгидраты во время Российско-болгарской экспедиции (рейс НИС «Витязь») в конусе выноса р. Дуная на глубине около 800 м (горизонт  $\sim 14 \text{ см}$ ). Наибольшее количество газгидратов обнаружено вблизи действующих грязевых вулканов, особенно во впадине Сорокина (вулканы Двуреченский, Одесса, Севастополь и Ялта) [16–18].

\* \* \*

Итак, Черное море можно отнести к углеводородным бассейнам со сложной тектоноструктурной и осадочной историей. Дегазация его недр осуществляется в основном через грязевые вулканы и многочисленные зоны нарушения осадочного чехла. Метан этих флюидов, как правило, полигенный. Лишь в водной толще, по разным оценкам, содержится от 80 млрд  $\text{м}^3$  до 108 млрд  $\text{м}^3$  метана [3, 5].

История изучения газгидратов Черного моря только начинается. ■

### Литература / Reference

1. Леин А.Ю., Иванов М.В. Сопряженность биогеохимических циклов серы и углерода в морских бассейнах на примере Черного моря. Докл. АН. 2018; 481(1): 941–944. [Lein A.Yu., Ivanov M.V. Interaction biogeochemical cycles of sulfur and carbon in marine basins on the example of the Black Sea. Doklady Earth Sciences. 2018; 481(1): 939–942.] Doi: 10.31857/S086956520001382-3.

2. Система Черного моря. Отв. ред. А.П.Лисицын. М., 2018. [The Black Sea System. Moscow, 2018. A.P.Lisytzin (ed.). (In Russ.)]
3. Егоров В.Н., Артемьев Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море. Средообразующая и экологическая роль. Севастополь, 2011. [Egorov V.N., Artemiev Yu.G., Gulin S.B. Methane seeps in the Black Sea. Environmental and ecological role. Sevastopol, 2011. (In Russ.)]
4. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев, 2013. [Shnyukov E.F., Kobolev V.P., Pasyunkov A.A. Gas Volcanism of the Black Sea. Kiev, 2013. (In Russ.)]
5. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М., 2009. [Lein A.Yu., Ivanov M.V. Biochemical Cycle Methane in the Ocean. Moscow, 2009. (In Russ.)]
6. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Нежданов А.И., Гулин С.Б. Явление активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря. ДАН УССР. 1989; (12): 13–16. [Polikarpov G.G., Egorov V.N., Nezhdanov A.I., Gulin S.B. The phenomenon of active gas emission from uplifts on the dumps of the depths of the western part of the Black Sea. DAN UkrSSR. 1989; (12): 13–16. (In Russ.)]
7. Иванов М.В., Леин А.Ю., Карначук О.В. Новые доказательства биогенной природы сероводорода в Черном море. Геохимия. 1992; 8: 1186–1194. [Ivanov M.V., Lein A.Yu., Karnachuk O.V. New evidence for the biogenic nature of hydrogen sulfide in the Black Sea. International Geochemistry. 1993; 30(3): 112–121.]
8. Michaelis W., Seifert R., Nauhaus K.T. et al. Microbial reefs in the Black Sea fueled by anaerobic oxidation of methane. Science. 2002; 297: 1013–1015.
9. Пименов Н.В., Русанов И.И., Юсупов С.К. и др. Микробиологические процессы на границе аэробных и анаэробных вод в глубоководной зоне Черного моря. Микробиология. 2000; 69(4): 527–540. [Pimenov N.V., Rusanov I.I., Yusupov S.K. et al. Microbial processes at the aerobic–anaerobic interface in the deep-water zone of the Black Sea. Microbiology. 2000; 69: 436–448.]
10. Леин А.Ю., Иванов М.В., Пименов Н.В., Гулин М.Б. Геохимические особенности карбонатных построек, образующихся при микробном окислении метана в анаэробных условиях. Микробиология. 2002; 71(1): 89–102. [Lein A.Yu., Ivanov M.V., Pimenov N.V., Gulin M.B. Geochemical characteristics of the carbonate constructions formed during microbial oxidation of methane under anaerobic conditions. Microbiology. 2000; 71: 78–90.]
11. Иванов М.В., Поликарпов Г.Г., Леин А.Ю. и др. Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовыделений Черного моря. ДАН СССР. 1991; 320(5): 1235–1240. [Ivanov M.V., Polikarpov G.G., Lein A.Yu. et al. Biogeochemistry of the carbon cycle in the area of methane gas emission of the Black Sea. DAN USSR. 1991; 320(5): 1235–1240. (In Russ.)]
12. Иванов М.К. Фокусированные углеводородные потоки на глубоководных окраинах континентов. Автореф. дисс. ... д.г.-м.н. М., 1999. [Ivanov M.K. Focused hydrocarbon streams on the deep-water margins of the continents. Author. diss. ... Dr. geol.-miner. sc. Moscow, 1999. (In Russ.)]
13. Voetius A., Revenschlag K., Schubert C.J. et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. Nature. 2000; 407: 623–626.
14. Ефремова А.Г., Жижченко Б.П. Обнаружение кристаллогидратов газов в осадках современных акваторий. ДАН СССР. 1974; 214(5): 1179–1181. [Efremova A.G., Zhizhchenko B.P. Occurrence of crystal hydrates of gas insediments of modern marine basins. DAN USSR. 1974; 214(5): 1179–1181. (In Russ.)]
15. Bohrmann G., Ivanov M.K., Foucher J.P. et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Black Sea: New data from Dvurechenskii and Odessa mud volcanoes. Geo.-Mar. Lett. 2003; 23: 239–249.
16. Ivanov M.V., Lein A.Yu. Changes in the stable isotope composition of gases and minerals as a result of microbial activity. Instruments, Methods and Missions for the Investigation of Extraterrestrial Microorganisms. Proceedings of SPIE. Hoover R.B. (ed.). 1997; 3111: 395–404.
17. Kruglyakova R.P., Vyakov Y.A., Kruglyakova M.V. et al. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor. Geo.-Mar. Lett. 2004; 24(3): 150–162.
18. Bohrmann G., Schenck S. Marine gas hydrates of the Black Sea (MARGASCH). RV "Meteor" Cruise M52/1. Geo.-Mar. Rep. Kiel, 2002.

## Methane in the Black Sea

A.Yu.Lein

Shirshov Institute of Oceanology, RAS (Moscow, Russia)

The article summarized distribution patterns of focused methane outflows at the bottom of the Black Sea. In tectonically and morphologically disturbed areas of the bottom they present as a part of gas-bubble jets: seeps, mud volcanoes, and gas hydrates deposits.

**Keywords:** methane, Black Sea, seeps, mud volcanoes, gas hydrates.

# CIS-белок — новая мишень в иммунотерапии рака, или Следствие ведут биоинформатики

К.М.Пац<sup>1</sup>, Ю.Б.Порозов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия)

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М.Сеченова Минздрава РФ (Москва, Россия)

В прошлом году Нобелевская премия по физиологии или медицине была присуждена Дж.Аллисону и Т.Хондзэ за «открытие терапии онкологических заболеваний путем подавления негативной иммунорегуляции», в частности, контрольных точек (чекпойнтов) иммунного ответа — CTLA-4 и PD-1, на основе которых уже созданы противоопухолевые препараты. Однако существуют и другие чекпойнты, в их числе — белок CIS. В статье приводятся результаты компьютерного моделирования, проведенного для изучения функций CIS-белка, и обсуждается возможность его использования для разработки лекарственных средств против рака.

**Ключевые слова:** иммуноонкология, CIS-белок, молекулярная динамика, молекулярное моделирование.

**И**ммунная система — главная защита нашего организма. Однако, как говорят, и на Солнце есть пятна. Иммунную систему легко могут обмануть злокачественные клетки, в результате чего она перестает их распознавать, давая им полную свободу для дальнейшего размножения. Можно ли противостоять этому?

Еще в 1980-х годах Дж.Эллисон и Т.Хондзэ открыли так называемые контрольные точки иммунного ответа (англ. immune checkpoints) — белки CTLA-4 и PD-1, способные подавлять его активацию\*. На основе этих открытий, удостоенных Нобелевской премии 2018 г., уже разработаны лекарства для иммунотерапии рака. Однако существуют и другие молекулы, обла-



**Карина Михайловна Пац**, студентка магистратуры Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университета ИТМО) по направлению «Хемоинформатика и молекулярное моделирование». Занимается компьютерным моделированием взаимодействий «мишень-лиганд», а также построением автоматических компьютерных систем для виртуального скрининга. Лауреат конкурса «Био/мол/текст-2017» в номинации «Своя работа».  
karina.m.pats@gmail.com



**Юрий Борисович Порозов**, кандидат медицинских наук, доцент кафедры интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере Университета ИТМО, заведующий лабораторией структурной биоинформатики Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М.Сеченова. Область научных интересов — структурная биоинформатика, математические модели подвижности белков, молекулярное компьютерное моделирование, компьютерный дизайн лекарств.  
yuri.porozov@gmail.com

дающие схожими функциями, и одна из них — белок CIS. Может ли он стать новой мишенью для создания противоопухолевых препаратов? Для ответа на этот вопрос необходимо было изучить функции CIS-белка, чему в значительной степени способствовали методы компьютерного моделирования.

\* Подробнее см.: Недоспасов С.А. Лауреаты Нобелевской премии 2018 года. По физиологии или медицине — Дж.Эллисон и Т.Хондзэ // Природа. 2018. №12. С.80–84. — *Примеч. ред.*

### Иммунная система vs рак

Имуноонкология — сравнительно молодой раздел медицинской науки, в задачи которого, как следует из названия, входят изучение «поведения» иммунной системы при онкологических заболеваниях и поиск способов борьбы со злокачественными опухолями с привлечением защитных сил организма [1]. Как же это происходит? Агентами в иммунотерапии рака служат ингибиторы контрольных точек иммунного ответа, которые влияют на передачу различных сигналов внутри клеток и между ними, усиливая эти сигналы или, наоборот, угнетая [2]. Воздействуя на чекпойнты иммунной системы, можно направить ее действие в нужном нам направлении. Однако этот процесс непрост: чтобы тот или иной сигнал был усилен или подавлен, необходимы дополнительные сигналы — окружающие контрольную точку «соседи» должны подтвердить, что все происходит правильно.

Например, чтобы распознать и уничтожить чужеродные клетки (в частности, раковые), Т-лимфоцитам нужна помощь специфических белков главного комплекса тканевой совместимости (МНС, от англ. Major Histocompatibility Complex), который находится на поверхности антигенпрезентирующих клеток (АРС, от англ. Antigen-Presenting Cell) — дендритных клеток, макрофагов и др. Они расщепляют опухолевые белки (антигены) на небольшие фрагменты, которые связываются с МНС и предъявляются Т-лимфоцитам, точнее, их антигенраспознающим рецепторам (TCR,

от англ. T-Cell Receptor). Однако одного этого ко-стимулирующего сигнала (рис.1,*а*) недостаточно, чтобы активировать Т-лимфоциты и они приобрели способность полноценно реагировать на антиген. Для этого необходим дополнительный сигнал, которым служит взаимодействие белков CD80 и CD86 (от англ. Cluster of Differentiation — кластеры дифференцировки), расположенных на поверхности АРС, с еще одним рецептором Т-лимфоцита — CD28.

Аналогичный механизм работает и при подавлении (ингибировании) сигналов, при этом на поверхности Т-лимфоцита распознается другой рецептор — CTLA-4. Эта одна из «нобелевских» молекул, как и CD28, может связываться с рецепторами на поверхности АРС, однако Т-лимфоциту «сообщается», что отвечать на найденный антиген не надо (рис.1,*б*). Таким образом, результат распознавания антигена в организме зависит от того, какие дополнительные сигналы (стимулирующие или ингибирующие) преобладают в данный момент. Правда, эта сбалансированная система работает эффективно до тех пор, пока в организме не начинаются сбои в распознавании — например, происходит злокачественная трансформация клеток. Когда это случается, работа таких контрольных точек, как CTLA-4, нарушается, и иммунные клетки перестают адекватно реагировать на опухоль. К тому же раковые клетки выработали разнообразные механизмы обхода иммунитета и использования системы контрольных точек в своих целях [4].

Очевидно, что все эти знания породили попытки «переобучить» иммунную систему, а также создать противоопухолевые лекарства, работающие на основе иммунологических принципов. Чаще всего такие препараты представляют собой антитела к ингибиторам контрольных точек иммунного ответа (например, ипилимумаб — ингибитор CTLA-4, см. рис.1,*в*); задача антител — не дать ингибиторам осуществить свою основную функцию. Тогда вновь вступают в игру стимулирующие сигналы, и Т-лимфоциты могут продолжить свою работу — эффективно распознавать злокачественные клетки.

Антитела к ингибиторам контрольных точек иммунного ответа сейчас довольно успешно выходят на стадию клинических исследований — неотъемлемого

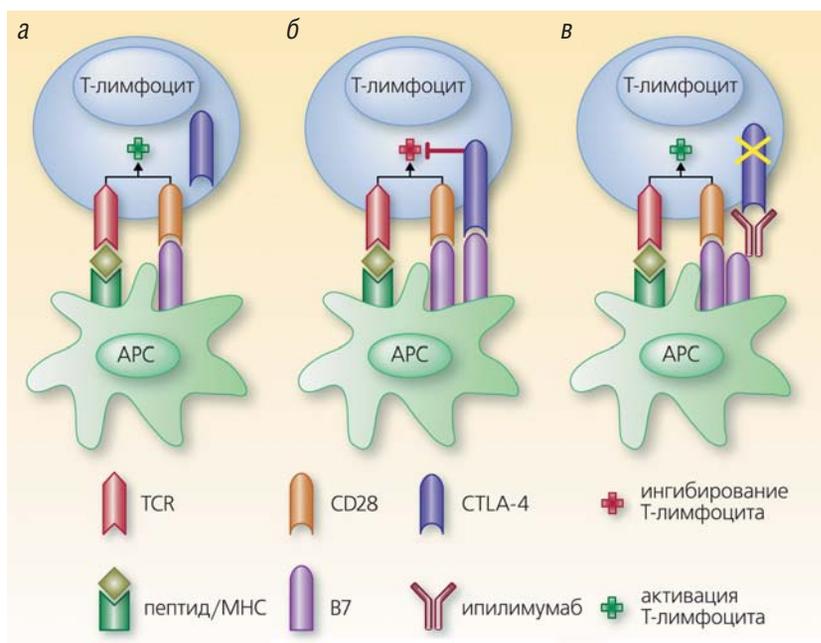


Рис. 1. Зависимость активации Т-лимфоцитов от типа сигналов, которые получает клетка: *а* — костимулирующие сигналы, *б* — ингибирующие сигналы; *в* — под действием ипилимумаба блокируется ингибирующий сигнал и включается стимулирующий (по: [3], с изменениями).

этапа разработки лекарства, когда оно проходит испытание на эффективность и безопасность. А некоторые из этих антител уже присутствуют на рынке фармпрепаратов (как уже упомянутый ипилимумаб, а также пембролизумаб — ингибитор другой «нобелевской» молекулы PD-1 и др.). Но несмотря на эти успехи, существуют и определенные проблемы, связанные непосредственно с белковой природой антител, а именно их высокой иммуногенностью, сложностью в разработке, а также повышенными требованиями к хранению [5]. Именно поэтому в ходе исследования мы решили сосредоточиться на разработке классической малой молекулы в этой области. К тому же к применению этого подхода располагает и строение мишени, как мы увидим далее.

В контексте данной статьи особый интерес представляет популяция клеток, называемых врожденными киллерами, чья специфическая функция — распознавание и уничтожение опухолевых клеток [6]. Белок CIS (или CISH, от англ. Cytokine-Inducible SH2-containing protein — индуцируемый цитокинами белок, содержащий SH2) относится к белкам семейства SOCS (от англ. Suppressor of Cytokine Signalling), которые регулируют сигнальный путь JAK/STAT (от англ. Janus kinase — Янус-киназа, которая названа так из-за присутствия в одной молекуле двух киназных доменов, и Signal Transducer and Activator of Transcription proteins — сигнальный преобразователь и активатор транскрипционных белков). Сигнальный путь JAK/STAT отвечает среди прочего за выработку различных цитокинов — медиаторов, регулирующих работу разных типов иммунных клеток [7]. Белок CIS — контрольная точка в JAK/STAT, поскольку способен блокировать передачу сигналов, в частности тех, которые необходимы для выработки цитокина IL-15.

Основная цель работы была поставлена следующим образом: с использованием методов биоинформатики и структурной биологии смоделировать структуру мишени и ее поведение в организме, а также найти фрагменты органических соединений, из которых было бы возможно получить низкомолекулярный ингибитор.

Как вы, наверное, уже начали догадываться, сама идея схожа с приведенным выше примером. Заблокировав работу CIS с помощью малой молекулы, по аналогии с блокадой CTLA-4, мы позволим сигналам передаваться по пути JAK/STAT. А значит, будут вырабатываться IL-15, а затем продолжится активное деление врожденных киллеров. Эта идея была проверена на экспериментальных мышах с неработающим *cish* (геном, отвечающим за синтез белка CIS): они оказались высокоустойчивыми к такому агрессивному виду рака, как меланома [7].

### Что можно смоделировать *in silico*

Сосредоточимся на наиболее интересных для нас исследованиях — изучении и анализе данных о функционировании мишени, а также на эксперименте по молекулярной динамике, который должен подтвердить или опровергнуть выдвинутые в ходе анализа данных гипотезы. Давайте немного порассуждаем. Допустим, мы знаем, что белок CIS — это некая контрольная точка, заблокировав которую, вероятно, мы сможем получить желаемый результат. Но как именно работает белок и что именно нужно (или не нужно) учитывать при разработке молекулы-ингибитора к данной мишени?

Три года назад австралийские ученые выяснили, что белок CIS во врожденных киллерах работает так: он не дает активироваться ключевому компоненту сигнального пути JAK/STAT, а именно Янус-киназе [7]. С одной стороны, CIS присоединяется к фосфорилированной аминокислоте — тирозину (pTyr), расположенному на киназе, что не позволяет ей перейти в активированное состояние, с другой — он способен напрямую участвовать в уничтожении JAK в протеасоме (своеобразной мусорной корзине для клеточных компонентов). Происходит это, вероятно, с помощью еще одного белка — элонгина В/С (рис.2) [8]. Правда, с ним тоже не все очевидно. Предполагается, что наличие или отсутствие свободного элонгина в клетке влияет на возможность присоединения CIS к фосфорилированному тирозину на JAK [7, 8]. Это для нас критически важно, поскольку наша задача — разработать молекулу, чтобы она аналогично pTyr связалась с CIS, заблокировав его работу.

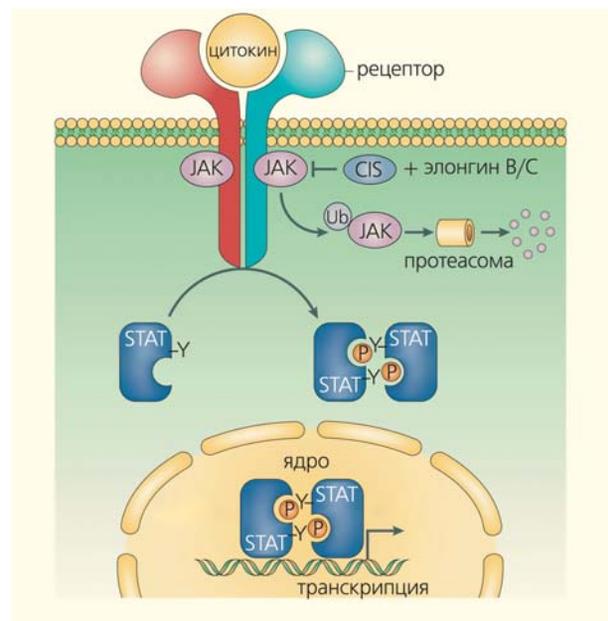


Рис.2. Схема сигнального пути JAK/STAT и место воздействия белка CIS (по: [9], с изменениями).

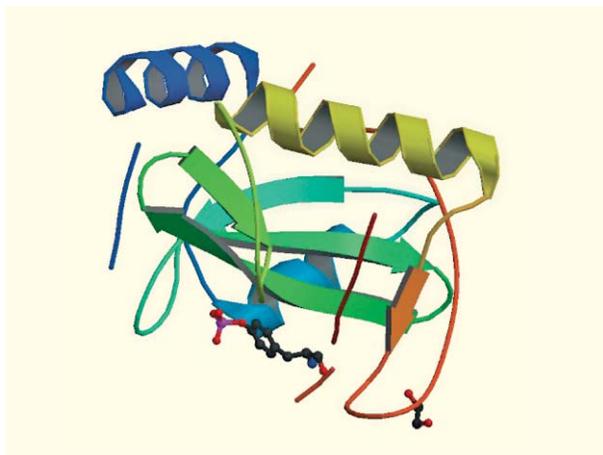


Рис.3. Структура SH2-домена белка семейства SOCS. Этот участок, состоящий из примерно 100 аминокислот, которые образуют две  $\alpha$ -спирали и антипараллельный  $\beta$ -слой, позволяет белкам этого семейства, в том числе и CIS, присоединяться к фосфорилированному тирозину, расположенному на других белках.

[rcsb.org/structure/2VIF](http://rcsb.org/structure/2VIF)

Допустим, элонгин играет некую роль в присоединении CIS к рТуг, при этом, возможно, происходит стабилизация консервативного для всех белков семейства SOCS участка — SH2-домена (рис.3). Его наличие позволяет белку присоединяться к рТуг, расположенному на других белках, что и происходит в случае CIS. Как разобраться с этой гипотезой с помощью методов биоинформатики? Можно провести эксперимент по молекулярной динамике, в котором симулируется поведение белковой молекулы (или целого комплекса) в организме с использованием программного пакета Schrödinger Small Molecules Drug Discovery Suite (Release 2017-1). Конечно, в компьютерном эксперименте делается ряд допущений. Например, исследуемая молекула помещается в кубик воды как преобладающего компонента в цитозоле, где и функционирует CIS. Симуляция проходит в течение некоторого ограниченного времени: чем оно больше, тем, вполне ожидаемо, будут более достоверные результаты. Однако этот параметр

ограничивается вычислительными мощностями и наличием/отсутствием графического процессора (в нашем случае молекулярная динамика длилась 100 нс).

Что можно выяснить в ходе такого моделирования? Рассмотрим график зависимости среднеквадратического отклонения (RMSD, от англ. root-mean-square deviation) от времени симуляции (рис.4). Выражаясь простым языком, данный график говорит о том, приобрела ли исследуемая молекула стабильность за время симуляции или нет. На графиках видно, что CIS и его комплекс с элонгином в конце концов достигают определенного плато. Однако даже невооруженным глазом можно заметить, что CIS сам по себе (без элонгина) ближе к постоянной, да и плато выглядит ровнее — меньше колебаний вокруг установившегося значения. А это значит, что, с одной стороны, 100 нс вполне достаточно, чтобы увидеть какие-либо изменения, происходящие с данными молекулами, а с другой — можно сделать вывод, что комплекс менее стабилен, чем сам белок.

Дополним эту картину еще одним графиком, на котором показана зависимость среднеквадратической флуктуации (RMSF, от англ. root-mean-square fluctuation) от номера конкретной аминокислоты в молекуле белка или комплекса (рис.5). Здесь мы подошли вплотную к поставленной задаче — к поиску аминокислоты, принадлежащей SH2-домену в обоих случаях, и сравнению подвижности (флуктуации) в каждом из них. И снова мы видим, что подвижность достаточно сильно различается (взгляните на максимальные значения в пределах выделенных участков по оси RMSF на каждом графике). Когда CIS находится вне комплекса, эта подвижность намного меньше — значит, стабилизации данного участка при образовании комплекса с элонгином не происходит.

Таким образом, оба графика не противоречат друг другу и так или иначе опровергают гипотезу, выдвинутую в начале эксперимента. Означает ли это, что элонгин никак не влияет на присоединение рТуг и что предположение ошибочно? Ни в ко-

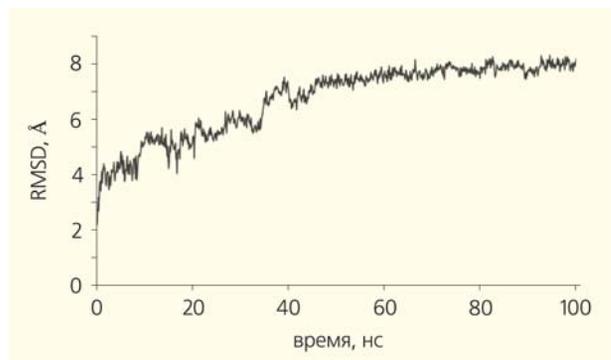
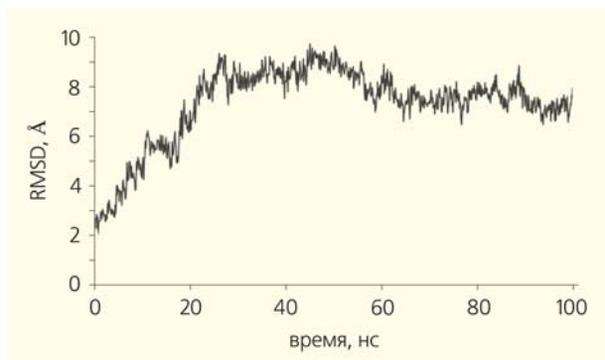


Рис.4. Зависимость RMSD от времени симуляции (нс). Слева результат для комплекса CIS-элонгин В/С, справа — для белка CIS.

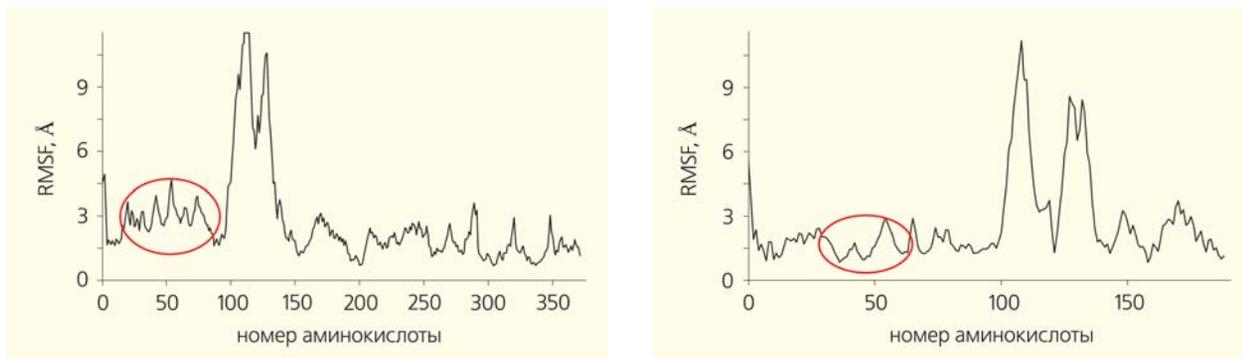


Рис.5. Зависимость RMSF от номера той или иной аминокислоты. Красным выделены участки, соответствующие SH2-домену. Слева — результат для комплекса CIS–элонгин В/С, справа — для белка CIS.

ем случае! Существует множество механизмов, по которым это может происходить, и мы проверили один из них. По крайней мере теперь мы знаем, что в дальнейшем сможем оперировать только структурой белка CIS вне каких-либо комплексов, ведь его образование не стабилизирует белок и не повлияет на разработку молекулы-ингибитора. Какие методы можно еще подключить?

Трехмерную структуру белка CIS, которая использовалась в том числе и в молекулярной динамике (экспериментально она, к сожалению, пока не создана), мы получили с помощью метода гомологичного моделирования и сервиса Protein Modeling Portal ([proteinmodelportal.org](http://proteinmodelportal.org)). Для разработки прототипа низкомолекулярного ингибитора использовали молекулярный докинг (от англ. dock – стыковка) небольшой библиотеки простейших органических соединений в заранее определенной области связывания. Молекулярный докинг — это один из методов компьютерного моделирования, который позволяет предсказать взаимовыгодное положение двух молекул относительно друг друга для образования устойчивого комплекса. После докинга (также с использованием программных продуктов Schrödinger) были скомбинированы наиболее удачные фрагменты этих соединений и проведен повторный докинг. Таким образом удалось сравнить расположение одного из соединений-лидеров и самого

фосфорилированного тирозина (который взаимодействует с CIS в естественных условиях) внутри кармана связывания, а также выявить аминокислоты, участвующие во взаимодействии с указанной областью на поверхности белка (рис.6).

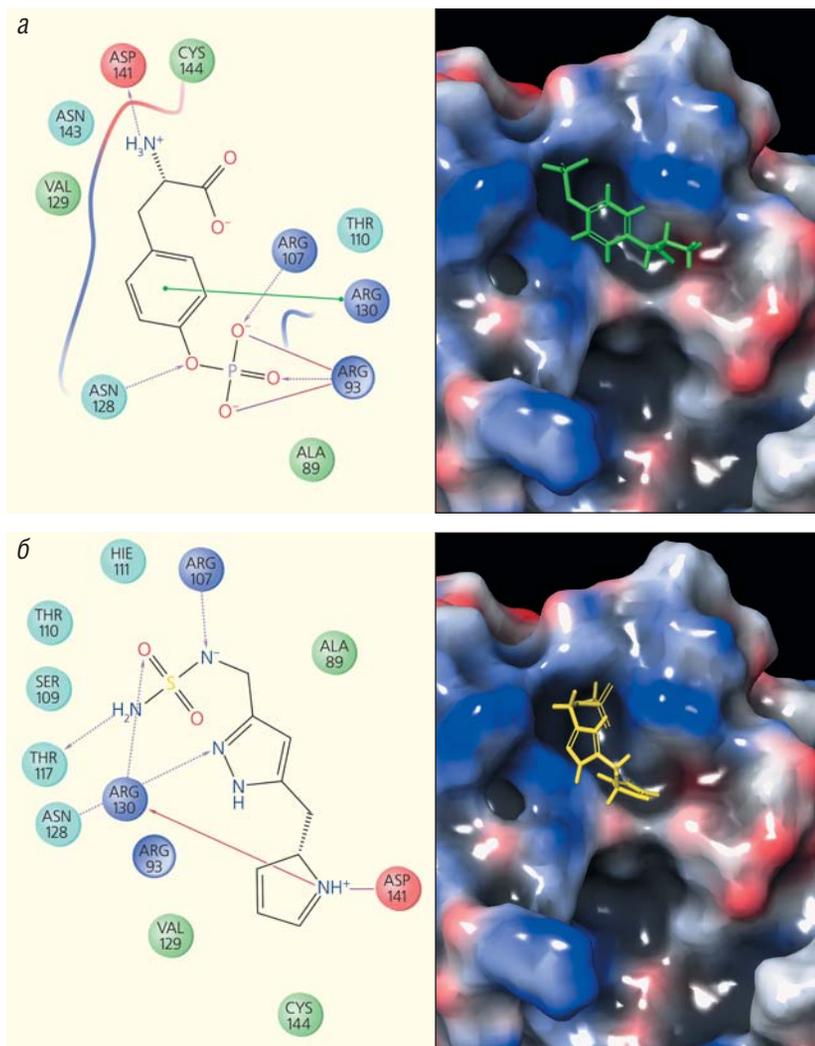


Рис.6. Структурные формулы фосфорилированного тирозина (а) и одного из соединений-лидеров (б); связи, которые они образуют на поверхности белка CIS, а также их размещение внутри области связывания (справа).

В результате такой комплексной работы мы получили первоначальные данные о функционировании малоизученной мишени — белка CIS — и предположили, какого типа низкомолекулярные ингибиторы смогут эффективно его блокировать. Вероятнее всего, они должны содержать ароматические кольца для формирования устойчивых  $\pi$ -связей, а также сульфамидную группу для улучшения растворимости.

\* \* \*

В завершение попытаемся ответить на вопрос, который, как мы полагаем, читателю важно узнать: насколько рациональна такая терапия? Вопрос справедливый. К примеру, ученым, усилия которых в течение почти четырех десятилетий были сосредоточены на использовании цитокинов (IL-2, IL-15, IL-21, IL-12) для распознавания и уничтожения раковых клеток, пришлось довольно быстро отказаться от идеи вводить интерлейкины непосред-

венно пациентам, так как наблюдались весьма агрессивные токсические реакции [10]. Кроме того, существует риск возникновения аутоиммунных реакций, даже если вызвать активную выработку этих соединений самим организмом. Очень важно понимать, насколько ответственной является разработка такого ингибитора. Безусловно, идеальный вариант применения иммунотерапии рака — ее комбинация с другими методами лечения [10].

Главное — не забывать о том, что, нарушая работу того или иного сигнального пути, мы неизбежно влияем на какие-то другие процессы в организме, поскольку абсолютно все взаимосвязано между собой. Чем детальнее и точнее продумано исследование, изучена литература, проведены предварительные испытания (в том числе и моделирование, которое также позволяет ответить на ряд важных вопросов), тем больше шансов получить действительно стоящую разработку, которая сможет спасти не одну жизнь. ■

## Литература / References

1. Couzin-Frankel J. Cancer Immunotherapy. *Science*. 2013; 342(6165): 1432–1433. Doi:10.1126/science.342.6165.1432.
2. Pardoll D.M. The blockade of immune checkpoints in cancer immunotherapy. *Nat. Rev. Cancer*. 2012; 12(4): 252–264. Doi:10.1038/nrc3239.
3. Postow M.A., Callahan M.K., Wolchok J.D. The Antitumor Immunity of Ipilimumab: (T-cell) Memories to Last a Lifetime? *Clin. Cancer Res.* 2012; 18(7): 1821–1823. Doi:10.1158/1078-0432.CCR-12-0409.
4. Schreiber R.D., Old L.J., Smyth M.J. Cancer Immunoeediting: Integrating Immunity's Roles in Cancer Suppression and Promotion. *Science*. 2011; 331(6024): 565–1570. Doi:10.1126/science.1203486.
5. Adams J.L., Smothers J., Srinivasan R. et al. Big opportunities for small molecules in immuno-oncology. *Nat. Rev. Drug Discov.* 2015; 14(9): 603–622. Doi:10.1038/nrd4596.
6. Vivier E., Tomasello E., Baratin M. et al. Functions of natural killer cells. *Nat. Immunol.* 2008; 9(5): 503–510. Doi:10.1038/ni1582.
7. Delconte R.B., Kolesnik T.B., Dagley L.F. et al. CIS is a potent checkpoint in NK cell-mediated tumor immunity. *Nat. Immunol.* 2016; 17(7): 816–824. Doi:10.1038/ni.3470.
8. Piessevaux J., De Ceuninck L., Catteeuw D. et al. Elongin B/C recruitment regulates substrate binding by CIS. *J. Biol. Chem.* 2008; 283(31): 21334–21346. Doi:0.1074/jbc.M803742200.
9. Shuai K., Liu B. Regulation of JAK–STAT signaling in the immune system. *Nature Reviews Immunology*. 2003; 3(11): 900–911. Doi:10.1038/nri1226.
10. Floros T. Anticancer Cytokines: Biology and Clinical Effects of Interferon- $\alpha$ 2, Interleukin (IL)-2, IL-15, IL-21, and IL-12. *Semin. Oncol.* 2015; 42(4): 539–548. Doi:10.1053/j.seminoncol.2015.05.015.

## CIS is a New Target Protein in Immune-Oncology, or Investigation Held by Bioinformaticians

K.M.Pats<sup>1</sup>, Yu.B.Porozov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University (Saint Petersburg, Russia)

<sup>2</sup>Sechenov First Moscow State Medical University (Moscow, Russia)

Immune system is the main defensive power of our organism. However, even the Sun has some spots on it. Immune system may be easily deceived by the tumor cells. As a result, it stops recognizing them, giving them all the freedom for the further development. May we resist this process somehow? In 2018 the Nobel Prize was given to James Allison and Tasuku Honjo, who stood at the origins of the immune-oncology development in early 80s. They discovered CTLA-4 and PD-1 molecules, responsible for the inhibition of the immune response. On the basis of these discoveries several antitumor drugs have been developed. However, there are some other molecules, which are related to so-called immune checkpoints. One of them is CIS-protein, whose functions are discussed in this paper.

**Keywords:** immune-oncology, CIS-protein, molecular dynamics, molecular modeling.

# Микробиом ходов короедов: НОВЫЕ МЕТАГЕНОМНЫЕ ДАННЫЕ

Т.А.Кузнецова<sup>1</sup>, М.В.Вечерский<sup>1</sup>, А.А.Степаньков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН (Москва, Россия)

Согласно современным представлениям, короеды не могут самостоятельно разрушить древесину и действуют в симбиозе со специфическим микробным сообществом (микробиомом). Долгое время считалось, что в его основе офиостомовые грибы, вызывающие синюю гниль древесины и синтезирующие питательные вещества для насекомого. Однако наши метагеномные исследования показали, что офиостомовые грибы, чей рост обычно хорошо наблюдается визуально, это лишь небольшая часть изменений, которые происходят при инвазии короедов. Основные количественные изменения в грибном сообществе связаны с резким увеличением доли сахаролитических дрожжей семейства Saccaromycetales, в частности представителей рода *Kuraishia*, которые переносятся на поверхности короедов. В бактериальном сообществе происходит сдвиг в сторону доминирования семейств Enterobacteriaceae и Pseudomonadaceae.

**Ключевые слова:** короеды, метагеномные исследования, симбионты.

Большинство видов короедов, распространенных на территории России, поражает хвойные породы деревьев, что, правда, не обязательно приводит к скорой гибели леса. В каждом ельнике всегда находится немногочисленная популяция короедов, которая при определенных условиях может за один-два года нарастить численность до уровня очага массового размножения.

В субкортикальном слое — под корой — жуки-короеды находят специфическую экологическую нишу. С одной стороны, они относительно защищены от внешних условий и многочисленных потенциальных хищников. С другой — эта ниша представляет для них угрозу, поскольку само дерево со своей «иммунной системой» и симбионтами влияет на развитие жуков [1, 2].

От момента первичного заселения дерева короедами до его смерти многие микроорганизмы сосуществуют в субкортикальной среде обитания. Они могут быть эндофитами или эпифитами [3] или попадать под кору де-



**Татьяна Александровна Кузнецова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии, физиологии и функциональной морфологии высших позвоночных Института проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН. Область научных интересов — симбиотические микроорганизмы животных-фитофагов, микробная деградация растительных полимеров. tashka\_u@mail.ru



**Максим Валерьевич Вечерский**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Научные интересы связаны с метагеномикой сложных сообществ и влиянием микросимбионтов на физиологию организма-хозяина. vecherskomy@mail.ru



**Александр Александрович Степаньков**, ведущий специалист той же лаборатории. Область научных интересов — биоинформатика, математическое моделирование биологических систем. astepankoff@mail.ru

рева с помощью короедов [4, 5]. Данных о привнесении отдельных видов или родов микроорганизмов короедом в субкортикальный слой достаточно много [4–8]. Однако чаще всего работы ограничиваются или исследованием отдельных семейств и родов микроорганизмов, имеющих хозяйственное значение (преимущественно грибами), или относятся к конкретному виду жука-короеда. Наибольшее внимание в таких работах уделяется фитопатогенным грибам [6–9]. Например, в работах отечественных энтомологов по грибам, вызывающим синюю гниль древесины, было показано, что их типичные распространители – большой лиственничный короед (*Ips cembrae*), короед-типограф (*I. typographus*), черный пихтовый усач (*Monochamus urussovi*), древесинник полосатый (*Trypodendron lineatum*), большой сосновый лубоед (*Tomicus piniperda*) и разные виды граверов (*Pityogenes* spp.) [10]. Заражение ходов жуков этими грибами достигает 70–100%. Кроме того, офиостомовые грибы выделяют специфические вещества, такие как ароматические соединения, сивушные спирты и терпены, оказывающие воздействие на поведение короедов. Исследование грибов семейства Graphiaceae в Китае выявило новые виды, ассоциированные не только со смолевками (*Pissodes* spp.), но и с большим лиственничным короедом [11]. Североамериканский лубоед *Dendroctonus simplex* в значительной степени меняет структуру микробиома своих ходов за счет привнесения микроорганизмов, обнаруженных на его поверхности и в кишечнике [4].

Вместе с тем первичное инфицирование дерева одним видом короедов ведет за собой вторичное заселение другими видами. Например, было показано, что южный сосновый лубоед (*D. frontalis*) при большой плотности своей популяции поражает еловые насаждения и тем самым увеличивает ресурсную базу для многих другихксилофагов [12]. То, какой именно жук инициирует поражение дерева, малый еловый лубоед (*Hylurgops palliatus*) или малый еловый черный усач (*Monochamus sutor*), определяет дальнейшие паттерны развития сообщества [13]. Изменение субкортикального биома под воздействием сложившейся ассоциации короедов может помочь в понимании происходящих процессов трансформации и, возможно, в разработке средств борьбы с вредителями.

Мы провели метагеномный анализ бактериального и грибного сообществ материала ходов короедов и контрольных тканей (луба и заболони, соответствующих залеганию галерей, но не подверженных непосредственному влиянию жуков) европейской ели (*Picea abies*). Деревья были колонизированы несколькими видами короедов: короедом-типографом (*I. typographus*), большим еловым полиграфом (*Polygraphus punctifrons*), обыкновен-

ным гравером (*Pityogenes chalcographus*) и малым еловым лубоедом (*H. palliatus*). Данные мы получили путем метагеномного секвенирования нового поколения участков генов 16S рРНК для бактериального сообщества, а также спейсерного участка (ITS) – для грибного.

**Бактериальное сообщество ходов короедов и контрольных тканей.** Всего были обнаружены представители 16 филумов, 62 отрядов и 82 семейств. Как и ожидалось, микробный состав коры и ходов жуков-короедов существенно различался. В целом разнообразие семейств в контрольных образцах было ниже (индекс Шеннона  $H = 2.12$  в контроле и  $H = 3.89$  в ходах короедов).

Интересно, что в непораженной ткани на хлоропласты ели приходится более двух третей всех полученных последовательностей, а в зараженных короедом их менее 0.01%, так как здоровые ткани растения перевариваются и ДНК хлоропластов лизируется.

В бактериальных сообществах, как в контрольных, так и в поврежденных короедом тканях, доминировали представители филума Proteobacteria (62.7% в контрольных образцах и 84.3% в галереях короедов). Этот филум преобладает в древесине как разлагающихся, так и растущих хвойных деревьев [14], что говорит о способности этих бактерий к потреблению доступных питательных веществ в условиях повышенной кислотности окружающей среды.

Представители филумов Bacteroidetes и Actinobacteria составляли соответственно 7.35% и 4.5% в материале стенок ходов жуков. В контрольных тканях их доля не превышала 1%.

В не поврежденных короедом тканях доминирующие позиции занимали представители семейства Xantomonadaceae (40.5%), доля Enterobacteriaceae составляла 11.2%. Индексы обилия бактерий семейств Pseudomonadaceae и Acetobacteriaceae также превышали 2%. Представители *Erwinia* (около 10%), *Pseudomonas* (2.0%) и *Pseudoxantomonas* (2.3%) преобладали на родовом уровне (рис.1).

Разнообразие бактерий в галереях и буровой муке жуков-короедов было выше, чем в контрольной коре. Состав доминирующих бактерий значительно менялся. Род *Erwinia* сохранял свои позиции, однако его доля существенно возрастала (до 55%). Обилие псевдомнад также увеличивалось (до 4%); в доминанты выходили и представители рода *Cryseobacterium* (2.3%).

Преобладание представителей семейства Enterobacteriaceae и рода *Pseudomonas* было ранее отмечено на поверхности *D. simplex* [4]. Кроме того, было показано, что привнесенные короедом микроорганизмы способны метаболизировать монотерпены и фенольные соединения, уменьшая токсическую нагрузку на жуков. Такая активность была показана

на для представителей рода *Pseudomonas* и некоторых энтеробактерий [15, 16]. Кроме того, оказалось, что новый вид *E.typographi*, выделенный из кородеда-типографа, обладал резистентностью к высоким концентрациям монотерпенов [17]. Возможно, это объясняет значительное увеличение доли бактерий родов *Erwinia* и *Pseudomonas* в поврежденных тканях ели.

Появление некоторых родов бактерий в галереях и буровой муке кородедов можно связать и с целлюлозолитической активностью этих микроорганизмов. Так, например, была показана возможность разлагать целлюлозу для бактерий *Stenotrophomonas*, выделенных из кишечника рыжего соснового лубоеда (*D.valens*) [18], для *Pseudomonas* из малого ясеневое лубоеда (*Hylesinus fraxini*) [19] и из личинок *D.armandi* [20], а также для представителей родов *Serratia*, *Methylobacterium*, *Paenibacillus*, *Bacillus*, *Pseudoxanthomonas* и *Sphingomonas*, выделенных из взрослых особей *D.armandi* [20]. Некоторые из перечисленных родов мы обнаружили только в галереях, а другие значительно увеличивали свою численность в присутствии кородедов.

**Грибные сообщества галерей кородедов и коры** были представлены аско- и базидиомицетами. При этом доля аскомицетов в грибном сообществе неповрежденных тканей – более 50%, а в материале галерей – более 80%.

Известно, что в разлагающихся тканях упавших ветвей и поваленных деревьев хвойных пород доминируют базидиомицетовые грибы. Изменение сообщества в сторону доминирования аскомицетов было обнаружено в деревьях, пораженных кородедом *Dendroctonus rhizophagus* [21].

Среди базидиомицетов неповрежденной коры нет четко выраженных доминантов (рис.2,а). Сразу несколько семейств отличаются высоким обилием (относительно общего количества базидиомицетов): Coniophoraceae (23.1%), Exobasidiaceae (20.0%), Meruliaceae (10.8%), Microsporomycetaceae (9.2%), Sporidiobolaceae (7.7%), Fomitopsidaceae (6.2%). Доля представителей семейств Omphalotaceae, Chionosphaeraceae и Buckleyzymaceae составляла от 3 до 5%. Стоит отметить, что базидиомицетовые дрожжи были представлены более чем 10% последовательностей от общего количества прочтений (ридов) для базидиомицетов.

В базидиомицетном сообществе галерей и буровой муки жуков-кородедов доля дрожжей возросла до 30%, а сообщество недрожжевых базидиомицетов кардинально изменилось. В абсолютные доминанты вышли представители семейства Coniophoraceae (45.4%), а субдоминировали Chionosphaeraceae (20.9%). Грибы Exobasidiaceae, Meruliaceae, Microsporomycetaceae, Sporidiobolaceae, Fomitopsidaceae, Omphalotaceae, Chionosphaeraceae и Buck-

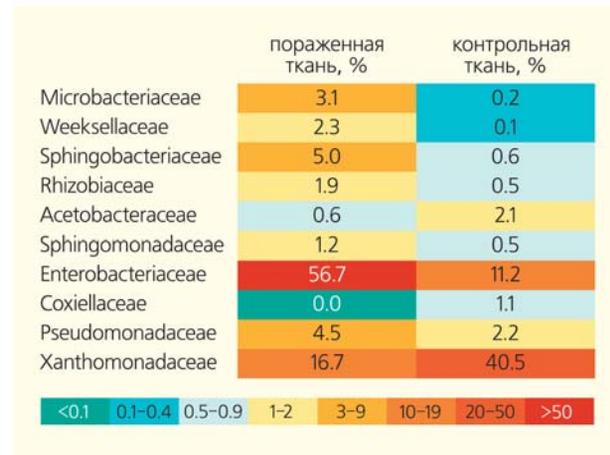


Рис.1. Тепловая карта, представляющая основные доминирующие семейства бактерий в коре и материале ходов кородедов.

leyzymaceae в образцах из ходов и буровой муки кородедов обнаружены не были.

Среди аскомицетов наибольшим обилием в контрольных образцах характеризуются дрожжи Saccharomycetes (35.7%) и паразитические грибы высших растений Sordariomycetes (23.6%) (рис.2,б). При колонизации дерева жуками-кородедами обилие дрожжей возрастает до 79.6%, а доля сордарио-

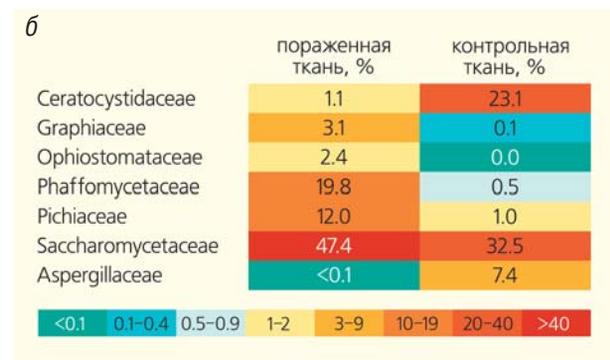
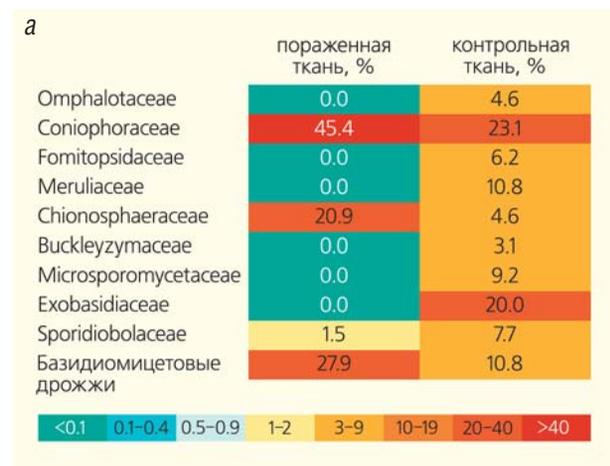


Рис.2. Тепловая карта, представляющая основные доминирующие семейства базидиомицетовых (а) и аскомицетовых (б) грибов в коре и материале ходов кородедов.

мицетовых грибов снижается (9.7%). Кроме того, меняется и состав сордариомицетов: если в коре доминируют представители семейства Ceratocystidaceae (12% от общего числа ридов), то после заселения короедов их доля падает до 0.8%. На доминирующие позиции выходят представители семейств Graphiaceae и Ophiostomataceae (2.5% и 2.0% от общего числа ридов соответственно).

Неоднократно было показано, что в кишечном тракте короедов, проложенных ими ходах и личиночных камерах, а также в буровой муке постоянно присутствуют аскомицетовые дрожжи [22]. Они могут участвовать в пищеварении, в детоксикации среды обитания и в выработке феромонов, необходимых для взаимодействия насекомых. Кроме того, некоторые виды, в том числе *Candida oregonensis*, *C.piceae*, *Danielozyma ontarioensis*, *Kuraishia capsulate*, *Ogataea pini* и *Yamadazyma scolyti*, развиваются исключительно в местообитаниях, связанных с короедами, независимо от географии выделения [22, 23]. Стоит отметить, что в наших исследованиях в ходах короедов обилие рода *Kuraishia* увеличилось более чем в два раза, достигнув 36.2%.

Грибы семейства Graphiaceae известны как сапротрофные организмы древесины. Два новых вида рода *Graphium* были недавно описаны в ассоциациях с большим листовичным короедом в Китае [16].

Представители семейства Ophiostomaceae (аскомицетовые) относятся к грибам синевы древесины. Они наносят наибольший ущерб хвойным, если связаны с агрессивными видами насекомых-ксилофагов, которые способны нападать на живые деревья [10]. В этом случае грибы родов *Ceratocystis*, *Ceratocystiopsis*, *Grosmannia* и *Ophiostoma*, кото-

рые заносятся насекомыми в проводящие ткани хвойных, активно распространяются во флоэме и заболони, увеличивая размеры поврежденных насекомыми участков сосудистой ткани, нарушают транспорт воды и питательных веществ по стволу и способствуют быстрому усыханию и гибели растения-хозяина [9].

\* \* \*

Инвазия короедов весьма характерно изменяет микробиологический профиль пораженной древесины. Вне зависимости от видовой принадлежности паразита можно выделить общие уникальные изменения, которые происходят в микробиоме пораженной ткани. Для сообщества прокариот характерно резкое наращивание численности энтеробактерий, поступающих из самих жуков, а также представителей семейств Sphingobacteriaceae и Microbacteriaceae, участвующих в разложении древесины. В целом микробное разнообразие увеличивается более чем в полтора раза. Для сообщества грибов характерно резкое увеличение численности сахаролитиков из-за инфильтрации флоэмного сока в пораженные участки. Эта группировка растет как за счет типичных для древесины сахаролитиков, так и благодаря уникальным дрожжам, привносимым короедами. Также появляются типичные мицелиальные фитопатогенные грибы семейства Ophiostomaceae, переносимые насекомыми. Помимо них увеличивается разнообразие неспецифических сапротрофных мицелиальных аскомицетовых грибов. Таким образом, поражения древесины короедами вызывают микробные сукцессии, отличающиеся от тех, которые происходят при механических и возрастных поражениях. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-04-01726).

## Литература / References

1. Adams A.S., Currie C.R., Cardoza Y. et al. Effects of symbiotic bacteria and tree chemistry on the growth and reproduction of bark beetle fungal symbionts. Canadian Journal of Forest Research. 2009; 39: 1133–1147. Doi:10.1139/X09-034.
2. Therrien J., Mason C.J., Cale J.A. et al. Bacteria influence mountain pine beetle brood development through interactions with symbiotic and antagonistic fungi: implications for climate-driven host range expansion. Oecologia. 2015; 179: 467–485. Doi:10.1007/s00442-015-3356-9.
3. Strid Y., Schroeder M., Lindahl B. et al. Bark beetles have a decisive impact on fungal communities in Norway spruce stem sections. Fungal Ecol. 2014; 7: 47–58. Doi:10.1016/j.funeco.2013.09.003.
4. Durand A.A., Bergeron A., Constant P. et al. Surveying the endomicrobiome and ectomicrobiome of bark beetles: the case of *Dendroctonus simplex*. Sci. Rep. 2015; 5: 17190. Doi:10.1038/srep17190.
5. Bracewell R.R., Six D.L. Broad-scale specificity in a bark beetle-fungal symbiosis: a spatio-temporal analysis of the mycangial fungi of the western pine beetle. Microb. Ecol. 2014; 68: 859–870. Doi:10.1007/s00248-014-0449-7.
6. Hernández-García J.A., Briones-Roblero C.I., Rivera-Orduña F.N., Zúñiga G. Revealing the gut bacteriome of *Dendroctonus* bark beetles (Curculionidae: Scolytinae): diversity, core members and co-evolutionary patterns. Sci. Rep. 2017; 7(13864): 13864. Doi:10.1038/s41598-017-14031-6.
7. Jankowiak R. Fungi associated with *Ips typographus* on *Picea abies* in southern Poland and their succession into the phloem and sapwood of beetle-infested trees and logs. For. Pathol. 2005; 35: 37–55.
8. Kirisits T. Fungal associates of European bark beetles with special emphasis on the ophiostomatoid fungi. In Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, A Synthesis, ed. F.Lieutier, K.R.Day, A.Battisti, J.-C.Gregoire, H.F.Evans. Dordrecht. 2004; 181–236.

9. Paine T.D., Raffa K.F., Harrington T.C. Interactions among scolytid bark beetles, their associated fungi, and live host conifers. *Annu. Rev. Entomol.* 1997; 42: 179–206. Doi:10.1146/annurev.ento.42.1.179.
10. Пашенова Н.В., Полякова Г.Г., Афанасова Е.Н. Изучение грибов синевы древесины в хвойных лесах Центральной Сибири. Хвойные бореальной зоны. 2009; 26(1): 22–28. [Pashenova N.V., Polyakova G.G., Afanasova E.N. Studies on blue timber fungi in coniferous forests of Central Siberia. Coniferous forests of the boreal zone. 2009; 26(1): 22–28. (In Rus.)]
11. Liu X., Lü Q., Meng X. et al. Identification and phylogeny of *Graphium* spp. (Microascales: Graphiaceae) associated with *Ips subelongatus* (Coleoptera: Scolytidae) in China. *Scientia Silvae Sinicae.* 2016; 52(8): 76–87. Doi: 10.11707/j.1001-7488.20160810.
12. Flamm R.O., Pulley P.E., Coulson R.N. Colonization of disturbed trees by the southern pine beetle guild (Coleoptera: Scolytidae). *Environ Entomol.* 1993; 22: 62–70. Doi:10.1093/ee/22.1.62.
13. Weslien J., Djupström L.B., Schroeder M., Widenfalk O. Long-term priority effects among insects and fungi colonizing decaying wood. *J. Anim. Ecol.* 2011; 80: 1155–1162. Doi:10.1111/j.1365-2656.2011.01860.x.
14. Sun H., Terhonen E., Kasanen R., Asiegbu F.O. Diversity and community structure of primary wood-inhabiting bacteria in boreal forest. *Geomicrobiol. J.* 2014; 31: 315–324. Doi:10.1080/01490451.2013.827763.
15. Boone C.K., Keefover-Ring K., Mapes A.C. et al. Bacteria associated with a tree-killing insect reduce concentrations of plant defense compounds. *Journal of Chemical Ecology.* 2013; 39: 1003–1006. Doi:10.1007/s10886-013-0313-0.
16. Xu L.T., Lu M., Sun J.H. Invasive bark beetle-associated microbes degrade a host defensive monoterpene. *Insect Sci.* 2016; 23: 183–190. Doi:10.1111/1744-7917.12255.
17. Skrodenyte-Arbaciauskiene V., Radziute S., Stunzenas V., Buda V. *Erwinia typographi* sp. nov., isolated from bark beetle (*Ips typographus*) gut. *International Journal of Systems and Evolution Microbiology.* 2012; 62: 942–948. Doi:10.1099/ijs.0.030304-0.
18. Morales-Jiménez J., Zúñiga G., Villa-Tanaca L., Hernández-Rodríguez C. Bacterial community and nitrogen fixation in the red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Microbial Ecology.* 2009; 58: 879–891. Doi:10.1007/s00248-009-9548-2.
19. Menendez E., Ramirez-Bahena M.H., Fabryova A. et al. *Pseudomonas coleopterorum* sp.nov., a cellulase-producing bacterium isolated from the bark beetle *Hylesinus fraxini*. *International Journal of Systems and Evolution Microbiology.* 2015; 65: 2852–2858. Doi:10.1099/ijs.0.000344.
20. Hu X., Yu J., Wang C., Chen H. Cellulolytic bacteria associated with the gut of *Dendroctonus armandi* Larvae (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Forests.* 2014; 5: 455–465. Doi:10.3390/f5030455.
21. Gonzalez-Escobedo R., Briones-Roblero C.I., Lypez M.F. et al. Changes in the Microbial Community of *Pinus arizonica* Saplings After Being Colonized by the Bark Beetle *Dendroctonus rhizophagus* (Curculionidae: Scolytinae). *Microb. Ecol.* 2018. Doi:10.1007/s00248-018-1274-1. Epub ahead of print.
22. Davis T.S. The Ecology of yeasts in the bark beetle holobiont: a century of research revisited. *Microb. Ecol.* 2015; 69(4): 723–732. Doi:10.1007/s00248-014-0479-1.
23. Menkis A., Lynikienė J., Marčiulynas A. et al. The great spruce bark beetle (*Dendroctonus micans* Kug.) (Coleoptera: Scolytidae) in Lithuania: occurrence, phenology, morphology and communities of associated fungi. *Bull Entomol Res.* 2017; 107(4): 431–438. Doi:10.1017/S0007485316001048.

## Microbiome of Bark Beetles: New Metagenomic Data

T.A.Kuznetsova<sup>1</sup>, M.V.Vecherskii<sup>1</sup>, A.A.Stepan'kov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS (Moscow, Russia)

According to modern concepts, bark beetles cannot independently decay wood timber, so they have to act in symbiosis with a specific microbial community. For a long time it was believed that the main component of the “bark beetle” microbiome is ophiostomoid fungi, which cause blue timber of wood and synthesize nutrients for the insect. However, our metagenomic studies have shown that ophiostomoid fungi, whose growth is often well observed, are only a small part of the changes that occur during invasion of bark beetles. The main changes in the fungal community are associated with a sharp increase in the abundance of Saccaromycetales yeasts, in particular, members of the genus *Kuraishia*, which are transferred at the surface of bark beetles. In the bacterial community, the shift towards the dominance of the families Enterobacteriaceae and Pseudomonadaceae was observed.

**Keywords:** bark beetles, metagenomics, symbiotic microorganisms.

# Псевдокарст на Лёссовом плато: аномальные проявления





Остаток псевдокарстового тоннеля. В стенках пещеры заметны системы крутопадающих трещин.

Фото автора

В западной части Лёссового плато Китая (провинция Ганьсу), на правом берегу Хуанхэ, к северо-востоку от г.Ланьчжоу находится район с аномальными (по густоте и морфологии) проявлениями псевдокарста. Верхние горизонты полукилометровой лёссовой толщи местами густо испещрены провалами и формами так называемой тоннельной эрозии. Глубина отвесных провалов достигает 10 м при сечении всего в несколько метров. Многие цепочки провалов располагаются диагонально по отношению как к изогипсам, так и к линиям тока вещества. Большинство провалов сформированы вне днищ ущелий. Регрессивная эрозия системы правобережных притоков Желтой реки, обеспечившая глубину расчленения в сотни метров, не стала следствием протекания псевдокарста, но создала предпосылки для него. Важнейшей из них стал эффективный дренаж подземных вод. В свою очередь, проявления тоннельной эрозии в результате обрушения сводов пещер «сгущают» сеть гидрографических элементов первых порядков. Они изначально сформированы суффозией и отмечены уцелевшими псевдокарстовыми мостами. Сохранившиеся отрезки пещер в верхах лёссовой толщи «оформлены» четкими зонами тектонической трещиноватости. Специфический структурный контроль аномального лёссового псевдокарста можно объяснить расположением данного района в эпицентральной области сильнее землетрясения 1920 г.

**Ключевые слова:** псевдокарст, лёсс, Лёссовое плато, землетрясения, тектонический контроль.



**Андрей Александрович Лукашов**, доктор географических наук, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структурная, динамическая, поисковая геоморфология и сравнительная планетология.  
e-mail: smoluk@yandex.ru

**Л**ёсс, по определению, обычно скрытослоистая, мягкая, однородная и, как правило, высокоизвестковистая, слегка сцементированная осадочная горная порода светло-желтого или палево-серого цвета. Сложена преимущественно алевроитом с подчиненным количеством пелита и мелкого песка. Преобладают (40–50%) зерна размером 0.01–0.05 мм; частично это — агрегаты, образовавшиеся при коагуляции более мелких коллоидных и глинистых частиц. Невыветрелые угловатые зерна лёсса состоят из кварца и полевого шпата с примесью слюд, роговой обманки и др. Глинистые частицы лёсса представлены гидрослюдой, каолинитом, монтмориллонитом. Для типичного лёсса характерно покровное залегание на разных геоморфологических элементах, отсутствие прослоев галечников, наличие ископаемых почв, иногда весьма редких. Часто лёссы содержат остатки раковин наземных моллюсков, кости и зубы сухопут-



Обнажение лёсса в южной части Лёссового плато, западнее г.Сиань. В разрезе четко прослеживается горизонт ископаемой почвы. Лёссы хорошо держат отвесную стенку.

Фото Т.Л.Смоктуневич

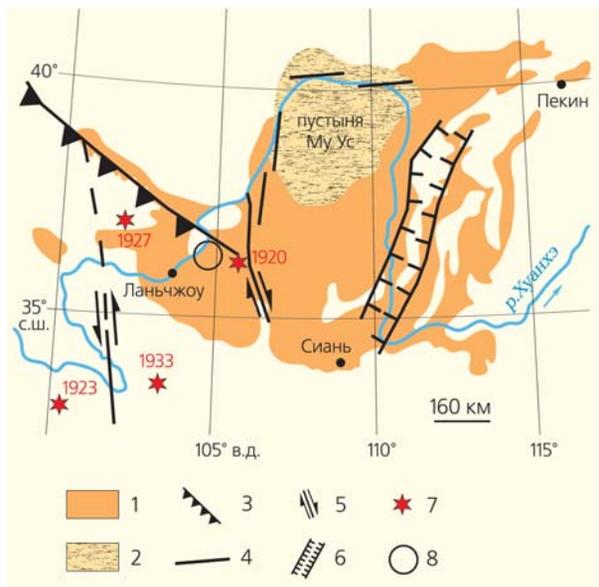


Схема разломной тектоники и очаги сильнейших землетрясений на фоне распространения лёссовых покровов [14, 16, 17]. Условные обозначения: 1 — лёссы повышенной мощности, 2 — дюнные песчаные комплексы Ордоса, 3 — крупнейший надвиг в основании северо-восточного макросклона горной системы Наньшань, ограничивающий с юго-запада Ганьсуйский коридор, 4 — кругопадающие разломы регионального ранга, 5 — сдвиги, 6 — грабен Шанси, 7 — эпицентры и даты катастрофических землетрясений XX в., 8 — обследованный район в западной части Лёссового плато.

ных млекопитающих, а также следы растений. Лёссы нередко пронизаны густой сетью узких вертикальных трубок (каналцев, макропор), оставленных корнями поколений травянистых растений. Трубки изнутри выстланы тонкой кальциевой коркой [1].

В естественном состоянии лёссы имеют крайне низкую влажность, но обладают высокой гигроскопичностью и дают большую усадку. Это обусловлено их специфической пористостью, составляющей 40–55%. Пылеватые частицы упакованы рыхло и касаются друг друга ребрами и вершинами. Частицы на контактах слабо сцементированы карбонатами, поэтому лёссы достаточно хорошо держат почти вертикальные стенки.

Ведущий специалист по процессам, наложенным на морфолитогенную основу лёссовых ландшафтов Китая, доктор Т.Жу (Т.Х.Zhu) из университета штата Миннесота (США) справедливо отмечает, что, несмотря на часто наблюдаемое во многих регионах суши сочетание развития оврагов с подпочвенной (тоннельной) эрозией, детальным исследованиям их пространственных взаимоотношений на сегодняшний день недостаточно [2]. Районом, где эти аномальные взаимосвязи удалось проанализировать непосредственно на местности, стал западный фланг Лёссового плато в средней части провинции Ганьсу.

На правом берегу р.Хуанхэ, в 20 км к юго-юго-западу от г.Цзинъюань, у северной окраины долины Цаосянь, мы с коллегами обследовали эрозионный бассейн с необычайно плотным сосредоточением предельно многообразных форм лёссового псевдокарста\*. Эрозия здесь достигает такого размаха, что борта соседних ущелий нередко смыкаются, образуя острые гребни. Деревня Цаосянь находится на одном из самых высоких (2100–2130 м) останцов междуречья шириной около 1 км, который протягивается на несколько километров между соседними субмеридиональными сухими ущельями [3].

### Лёссовое плато Китая

Собственно Лёссовое плато располагается между хребтом Тайханшань (на востоке), восточными отрогами системы Наньшань и хребтом Циньлин (на юге). У северного подножия хребта Циньлин плато пересечено грабеном Фэньхэ-Вейхэ. На севере оно соседствует с песчаной пустыней Ордос, на северо-западе ограничено пустыней Алашань. Площадь Лёссового плато — около 430 тыс. км<sup>2</sup>. Мощность лёссов в среднем составляет 230 м, местами достигает 500 м. Ущелья врезаются на глубину до 300 м, причем сама Хуанхэ здесь вскрывает дочетвертичные толщи. Возраст подошвы лёссовых отложений оценивается в 1.4 млн лет (эоплейстоцен). Лёссы подстилаются галечно-гравийным террасовым аллювием мощностью 10–20 м. Этот аллювий, в свою очередь, залегает на неогеновом цоколе, представленном красноцветными аргиллитами и песчаниками. Горизонтальная расчлененность поверхности достигает 5–6 км на 1 км<sup>2</sup>, вертикальная составляет 100–150 м.

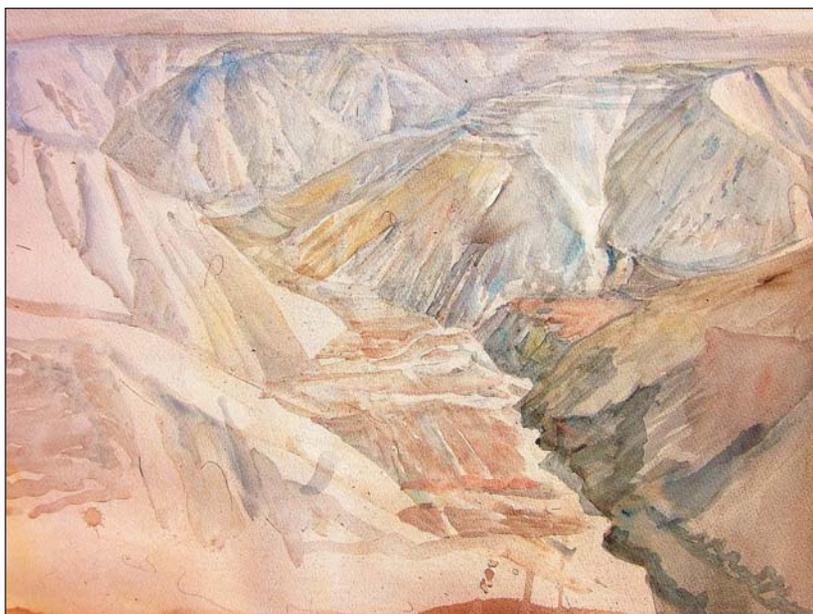
Обширная территория, заключенная внутри огромной дуги Хуанхэ, в тектоническом отношении представляет собой часть Китайско-Корейской платформы с жестким докембрийским фундаментом и мощным чехлом слабодислоцированных осадочных пород, которую называют плитой Ордос [4]. Большая часть Лёссового плато приурочена к синеклизе юго-западной окраины платформы, кото-

рая выполнена преимущественно красноцветными песчаниками мезозоя, перекрытыми лёссами. Лишь в северных пригородах Ланьчжоу, в верховьях оврага Ташагу (ущелье Лун Фэн Ся), в основании песчаников, эрозией левых притоков Хуанхэ вскрыты выветрелые гнейсы фундамента платформы. Это стало известно еще в 1883 г. [5].

На севере плато преобладают лёссовые гряды и увалы, расчлененные эрозией на глубину до 400 м и вытянутые с северо-запада на юго-восток согласно направлению господствующих муссонных ветров. Ближе к южным окраинам возрастают площади приводораздельных пологоволнистых вершинных поверхностей, которые расчленены ущельями, выработанными собственно в лёссах. На западе, на правом берегу Хуанхэ, Лёссовое плато приобретает облик глубоко и густо расчлененного плоскогорья [3].

### Лёссовый псевдокарст

Впервые проявления псевдокарста в пределах Лёссового плато Китая обнаружил немецкий геолог Фердинанд Рихтгофен [6]. Вслед за ним этим явлением заинтересовался В.А.Обручев. Во время своей Центрально-Азиатской экспедиции он неоднократно фиксировал псевдокарстовые формы. В последних числах декабря 1893 г. ученый описывал воронки и провалы в лёссе, обнаруженные в юго-восточной части плато: «...часто попадаются места, где... дорога уже разрезана вершиной оврага... или же с одной стороны зияет глубокий овраг, а с другой так называемая воронка, т.е. провал, сообщающийся с оврагом под почвой [полотном. — А.Л.]»



Панорама Лёссового плато. Примечательны формы эрозионного расчленения, сельскохозяйственные и мелиоративные террасы. Акварель С.А.Карауловой-Каре.

\* Автор искренне благодарит Р.Н.Курбанова, И.Г.Чубарова, Е.А.Константинова и В.А.Сарану за помощь в организации исследования, а также В.Р.Беляева, А.В.Кириллову, Т.Л.Смоктунувич и С.А.Караулову-Каре за помощь в подборе и оформлении иллюстраций.

дороги и угрожающий последней близким размывом; происхождение воронок объясняется... вертикальными трещинами в лёссе, в которые проникает вода и постепенно размывает почву, обуславливая ее оседание; местами верховья оврагов представляют настоящий провал в несколько сажен диаметром с вертикальными стенками, отделенный сплошной стеной в одну, две и более сажен толщиной от остальной части оврага и часто соединенный с последним воронкой различных размеров, зияющей на его дне; стенки оврагов местами совершенно отвесны...» [5, с.270]. Несколько южнее Обручев обнаружил любопытное косвенное свидетельство того, что в лёссе присутствуют крупные подземные полости: «Местами в толщах лёсса близ дороги на террасообразных уступах видны воронки различного диаметра; растения, растущие вокруг их устья, покрыты инеем, словно из этих воронок по ночам выделяется влажный и теплый воздух» [5, с.273].

Суть явления лёссового псевдокарста обычно заключается в формировании крупной подземной полости и последующем провале поверхности. По мнению А.А.Лаврусевича [7], происходит это в результате механических, физико-химических и биологических процессов, протекающих в лёссовых породах при воздействии на них эпизодических водотоков и организмов, а также при антропогенном прессинге. Среди причин лидирует именно механическая суффозия, так как содержание в лёссе водорастворимых соединений обычно не превышает 1% от веса породы [8, 9]. У этого правила, впрочем, есть исключения: в лёссах района Виксберг (США, штат Миссисипи) и особенно в лёссах провинции Ганьсу суммарные содержания СаО, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O существенно превышают 10%. Поэтому учитываться должен и процесс химического растворения. Однако на нем исследователи, к сожалению, внимание почти не фиксируют [10].

Так или иначе, при поступлении в толщу лёссов большого количества воды псевдокарст протекает стремительно. В пределах разных частей Лёссового плато (в особенности на его западном фланге) грунты активно поглощают муссонную влагу. Ее значительная доля переводится в подземный сток, предопределяя бурный характер лёссового псевдокарста. При активном развитии процесса местами образуется «псевдокарстовый бедленд» — участки, где невозможна хозяйственная деятельность (кроме, разве что, выпаса мелкого скота). К обширному развитию лёссового псевдокарста приводят низкая плотность верхних частей лёссовой толщи, фоновая зимняя сухость и неустойчивые структурные связи частиц лёссов. Все это предопределено прежде всего климатом и рельефом; меньшее значение имеет деятельность живых организмов.

Уже упомянутые исследователи лёссового псевдокарста подчеркивают, что вопрос о характере процессов, способствующих расширению полости на глубине — в стороны от вертикального канала, — ждет своего дальнейшего изучения. Весьма возможно, здесь «срабатывает» неравномерность трещиноватости лёссов, т.е. чередование (в плане и в разрезе) зон сгущения и разрежения тектонических трещин.

### Верхи лёссовой толщи и рельеф обследованного участка

Ущелье, в котором нам довелось работать, не имеет постоянного водотока. Его протяженность 2 км, глубина более 300 м, а ширина по бровкам — 250–600 м. Севернее деревни Цаосянь ущелье поворачивает на запад и открывается в долину более высокого порядка, водоток которой, в свою очередь, впадает в Хуанхэ. Поперечный и продольный профили ущелья ступенчатые. В верхнем уровне днища расположен глубокий (около 50 м) и узкий (30–70 м) каньонообразный донный врез. Верхние, относительно пологие, части склонов искусственно террасированы и заняты полями. Крутые (20–40°) участки осложнены более мелкими оврагами и рытвинами, а также многочисленными воронками и провалами размером до десятков метров в поперечнике. Именно эти провалы и представляют собой формы лёссового псевдокарста. Нередко они образуют цепочки, вытянутые вниз, а чаще — диагонально по склону. Появляются эти формы, как уже сказано, под воздействием суффозии и тоннельной эрозии, т.е. размыва и выноса материала в результате подповерхностного стока воды, а также растворения сульфатов и — главное — карбонатного цемента здешних лёссов.

В 2014 г. здесь работала российско-китайская экспедиция под руководством А.А.Величко [3]. В левом борту ущелья был заложен лёссовый разрез Цаосянь (36.2°с.ш., 104.4°в.д.). По результатам изучения его верхней части (мощностью 55 м) установлено, что позднеплейстоценовая лёссово-почвенная серия представлена однородной палеосерией супесью. В интервале глубин 15–29 м в разрезе отмечена повышенная макропористость и выявлены скопления карбонатных новообразований в виде рыхлых стяжений, что может указывать на рост интенсивности педогенеза в данной зоне. В интервале 37.0–43.5 м наблюдается уменьшение медианного диаметра частиц с 0.040 до 0.025 мм. Внутри интервала выражено три пика магнитной восприимчивости, которым соответствуют три зоны резких колебаний содержания СаСО<sub>3</sub>.

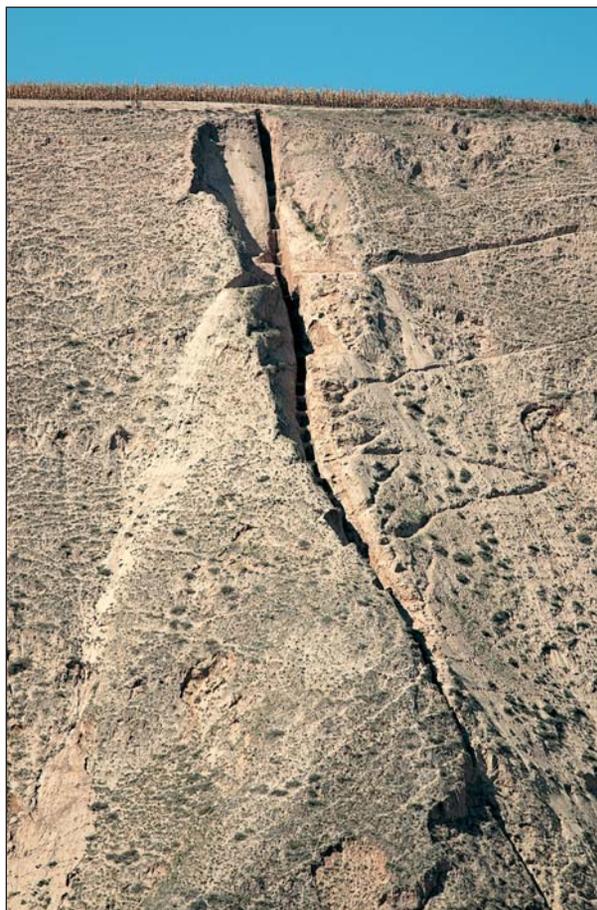
В механическом составе осадка от 53 до 81% приходится на фракцию алеврита (0.005–0.05 мм). Содержание глины изменяется от 13 до 33%, пре-

вышает 20% оно лишь в интервалах глубин 0–2, 20–27 и 35–45 м. На этих же уровнях содержание тонкого кварцевого песка (0.05–0.1 мм) золотой природы снижается до значений <10%. Разрез имеет слабовыраженную стратификацию по составу, отложения характеризуются повышенной сортированностью.

Микростроение осадков пылеватое, промьютное, агрегаты встречаются редко. Включения представлены Fe-Mn хлопьями; вертикальные трещины в массе палеопочв заполнены светло-бурым материалом с сероватым оттенком (вероятно, легкорастворимыми сульфатами типа тенардита или мирабилита). Цвет отложений в шлифах однородный, светло-бурый или палево-бурый; пропитка каким-либо материалом отсутствует. Изученная в разрезе толща почти не затронута криогенезом [3].

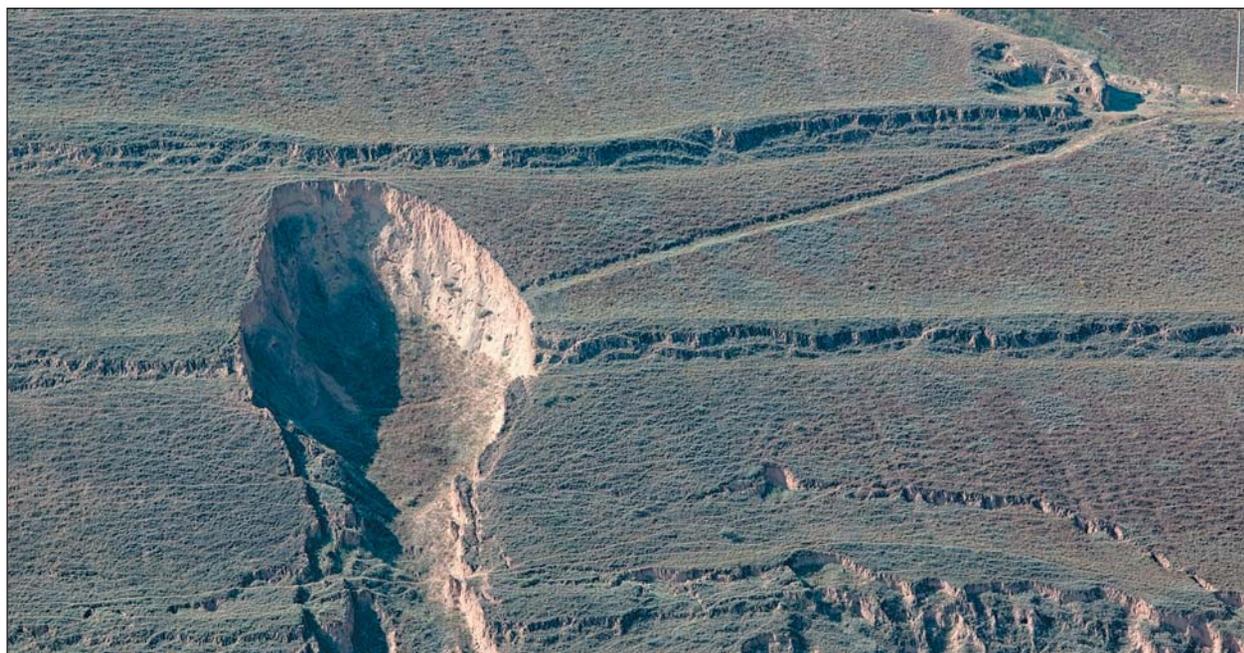
Рассматриваемый в данном регионе тип лёссового псевдокарста, в отличие от придолинного и балочного, развивается по трещинам глубокого заложения сейсмогенной природы — в соответствии с типизацией Лаврусевича [7]. Эти отвесные и крутопадающие трещины в лёссах поглощают атмосферные осадки (прежде всего ливневые), обеспечивая проникновение влаги на глубину в десятки метров. Подобная специфика гидрогеологических явлений значительно ускоряет псевдокарстовый процесс, так как нисходящий струйный поток движется с большой кинетической энергией.

В непосредственной близости от обследованных на местности ущелий обнаружено, что вершины псевдокарстовых оврагов в лёссах в плане имеют подковообразную форму.



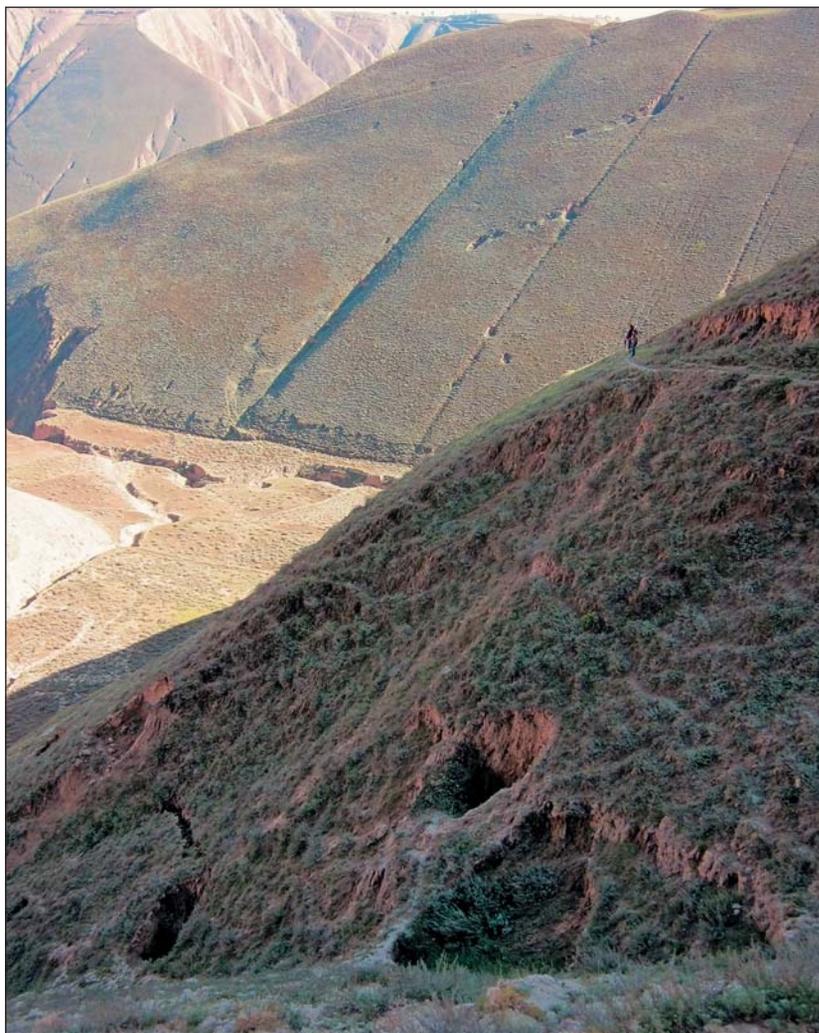
Разрез Цаосянь, изученный российско-китайской экспедицией под руководством А.А.Величко в 2014 г. [3]. Вскрыты верхние горизонты лёссовой толщи.

Фото А.В.Кирилловой



Подковообразное верховье псевдокарстового оврага, напоминающее эндову.

Фото А.В.Кирилловой



Колодцеобразные провалы поверхности, группирующиеся в диагональные цепочки (на дальнем плане).

Здесь и далее фото автора

Подобные водосборы могут быть приурочены к узлам пересечения тектонических трещин (так же, как и горные нивальные цирки, несущие сезонный снеговой покров). Похожие формы отмечены в средней полосе Европейской части России, где подковообразные или циркообразные вершины оврагов (со сходными отрицательными формами), внешним видом напоминающие древнерусские ковши, называют ендовой [11].

Наиболее распространенные формы лёссового псевдокарста в обследованном бассейне — это колодцеобразные провалы поверхности. Они часто встречаются в верхней и средней частях склонов эрозионных форм, нередко группируясь в своеобразные «провальные ансамбли». Многие провалы вытягиваются в цепочки, сплошь и рядом располагающиеся диагонально по отношению к линиям максимального уклона склонов.

В плане такие формы овальные или изометричны, их размеры в поперечнике ограничиваются не-

сколькими метрами. Существенно, что они обычно не приурочены даже к мельчайшим эрозионным формам, нарушая собой спокойные покатости склонов. По вертикали колодцеобразные провалы достигают многих метров, зачастую расширяясь с глубиной. Отвесные стенки покрыты мельчайшими эрозионными бороздками, промытыми последними ливнями.

Вопрос о соотношении во времени глубинной и тоннельной эрозии может иметь компромиссное решение. Вне эрозионных врезов, проникающих в поверхность плато на десятки метров, псевдокарст не проявляется — за отсутствием дренажа. Таким образом, вертикальное расчленение периферических частей плато должно рассматриваться как процесс первичный. Но в дальнейшем тоннельная эрозия прокладывает наклонные «ходы» в толще лёссов. Обрушение сводов тоннелей порождает линейные оврагоподобные формы, но это — не эрозионные врезы! На самых прочных отрезках бывших тоннелей образуются выразительные псевдокарстовые мосты. Под ними при редких ливнях осуществляется уже поверхностный сток ламинарного характера. Остатки псевдокарстовых тоннелей выражены наклонными пещерами в верховьях «оврагов». Поперечные сечения таких пещер составляют 1–1.5 м, в толщу лёссов они углубляются на многие метры. Самой примечательной особенностью тоннелей-пещер можно считать контроль их стенок системами крутопадающих трещин. Явление трещиноватости обычно не характерно для рыхлых толщ. Здесь же оно, вероятнее всего, связано с сейсмической обстановкой.

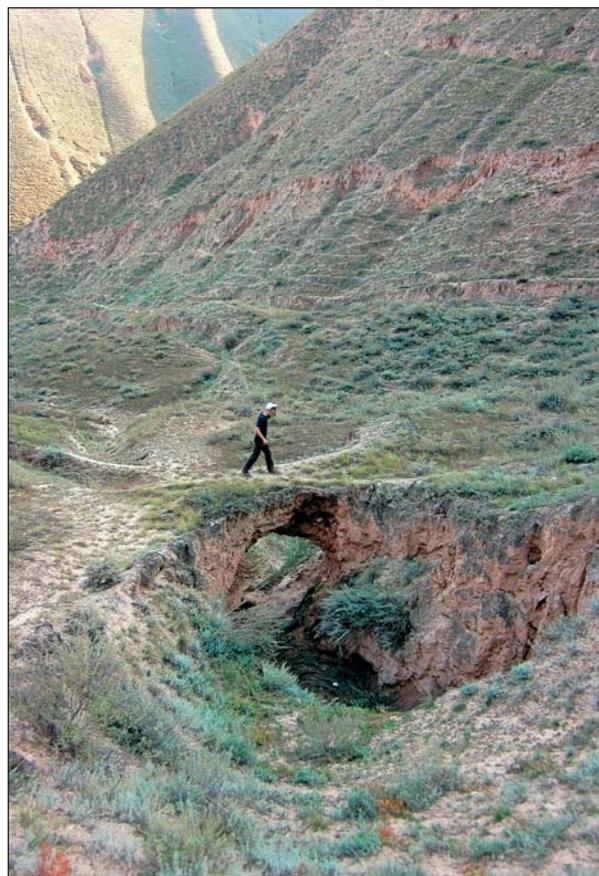
Лёссовый псевдокарст и сейсмичность

### Лёссовый псевдокарст и сейсмичность

Современные тектонические процессы деформируют земную кору и создают критические условия на границах литосферных блоков. Это, в свою очередь, обуславливает сейсмичность территории Китая и прилегающих областей. Природу сейсмичности этого региона с позиций теории тектоники плит исчерпывающе объяснить так и не уда-



Многометровый провал, расширяющийся с глубиной. Отвесные стенки покрыты эрозийными бороздками, промытыми ливнями.



Псевдокарстовый мост, сохранившийся на одном из самых прочных отрезков бывшего тоннеля.

ется. Дело в том, что большинство землетрясений Китая происходят внутри Евразийской плиты (все еще остающейся гипотетической).

Район исследований относится к высокоградиентной зоне перехода между двумя верхними «ступенями Рихтгофена». Через область юго-восточной оконечности системы Наньшань Рихтгофен трассировал тектоногенную дугообразную границу между Тибетской и Гобийской «ступенями» — важнейшими компонентами эндогенной топографии Китая [4, 6].

Рассматриваемая площадь находится в пределах Северо-Китайского блока — одного из самых активных внутриплитных сейсмических районов в мире, отмеченного мощными землетрясениями в прошлом и в настоящее время. Этот блок как геологическая провинция включает в себя стабильное Ордоское плато и обрамляющие его активные зоны разломов. Ордоская излучина обязана своим происхождением обтеканию плоскогорья рекой Хуанхэ именно по системе пересекающихся разломов [12]. Они группируются в рифтовые структуры, заложенные еще в миоцене: Иньчуань на западе, Хетао на севере, а также грабены Шаньси на востоке и Вейхе на юге. Именно в рифтовых зонах, обрамляющих Ордоское плато, сосредоточена сейс-

мичность. Латеральные перемещения в зонах перечисленных разломов составляют 1.2–6 мм/год [13]. Исторические данные свидетельствуют, что в районе развития континентальных рифтов произошло три землетрясения с магнитудой  $M = 8$  и более 30 землетрясений с  $M = 6$ .

Обследованный район Лёссового плато тяготеет к зоне динамического влияния трансрегиональных разломов сдвигово-надвиговой кинематики, ограничивающих с юга и юго-запада Таримскую и Китайско-Корейскую платформы. Левосторонней системой разломов обозначена северная граница всего Гималайско-Тибетского плато. Эти разломы определяют южный контур Таримской котловины и далее — уже в виде надвига — следуют по подножиям хребта Алтынтаг и горной системы Наньшань. Разломы пересекаются долиной Хуанхэ в 170–180 км ниже г.Ланьчжоу и далее трассируются на юго-восток до р.Вейхэ в районе г.Баоцзи. Оценки скорости голоценовых смещений здесь находятся в интервале 4–30 мм/год [14]. Именно к зоне надвига, трассирующегося в основании юго-западного горного обрамления так называемого Ганьсуйского коридора, приурочены эпицентральные области трех близких по времени мощных землетрясений



Аномальная плотность форм псевдокарста на западе Лёссового плато.

конца первой трети XX в. (1920, 1927 и 1932 гг.), унесших жизни 470 тыс. человек\*.

Одно из них (35.8° с.ш., 105.7° в.д.; магнитуда 7.8) произошло 12 декабря 1920 г. После землетрясения наблюдалось редкое явление — «лёссовый поток» — текучая смесь сухого пористого материала в воздухе [1]. Рассматриваемая часть Лёссового плато оказалась в эпицентре катастрофы. По-видимому, именно с тем землетрясением связано наличие трещин в лёссовых тоннелях и пещерах. Уже столетия назад В.Г.Лебедев отмечал, что после выхода Хуанхэ из горной области Цинхай в зоне сопряжения Китайско-Корейской платформы с подвижной геосинклинальной зоной Наньшаня можно видеть яркие следы молодых, очень интенсивных тектонических движений, *проявляющих-*

\* Известно, что при сильных землетрясениях крутые эрозионные склоны лёссового бедленда легко обрушаются, нередко приводя к катастрофическим последствиям.

Работа выполнена в рамках темы госзадания №AAAA-A-16-116032810089-5.

## Литература / References

1. Толковый словарь английских геологических терминов. Под ред. Дж.А.Джексона. М., 2002; 1. [Dictionary of English geological terms. J.A.Jackson (ed.). 2002; 1. (In Russ.).]
2. Zhu T.X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. *Geomorphology*. 2012; 153–154: 144–155.
3. Величко А.А., Янг Т., Алексеев А.О. и др. Сравнительный анализ изменений условий осадконакопления за последний межледниково-ледниковый макроцикл в лёссовых областях юга Восточно-Европейской равнины (Приазовье) и Центрального Китая (Лёссовое плато). *Геоморфология*. 2017; 1: 3–18. Doi:10.15356/0435-4281-2017-1-3-18. [Velichko A.A., Yang T., Alekseev A.O. et al. A comparative analysis of changing sedimentation conditions during the last interglacial-glacial macrocycle in the loess areas of the Southern East European Plain (the Azov Sea Region) and Central China (Loess Plateau). *Geomorphology*. 2017; 1: 3–18. (In Russ.).]
4. Лебедев В.Г. Основные проблемы геоморфологии Восточного Китая. Саратов, 1968. [Lebedev V.G. The main problems of geomorphology of East China. Saratov, 1968. (In Russ.).]

ся в особенностях строения рыхлого покрова и в рельефе [4]. Наши свежие наблюдения полностью подтверждают приведенное суждение.

Необходимо добавить, что взаимосвязь лёссового псевдокарста с сейсмической обстановкой — сюжет, в общем, известный. В Алтайском крае, западнее с.Елунина, в начале XXI в. даже основан небольшой резерват с громким наименованием «Сейсмообусловленный лёссовый карст». На левобережье широтного отрезка Оби, субпараллельно крутому берегу реки, в пределах сейсмоактивной Каменской зоны прослеживается цепочка западин глубиной 1–1.5 м, развитие которых было спровоцировано подвижками

в ходе Сузунского землетрясения 1931 г. Названная зона расположена на стыке юго-западной окраины Салаира и Колывань-Томской складчатой системы. Граница этих крупных структур проходит в 20–30 км севернее г.Камень-на-Оби, на линии Камень-на-Оби — пос.Сузун, по зоне субширотного Каменского глубинного разлома — крупной структуроконтролирующей единицы. Сейсмическая активность территории определяется землетрясениями интенсивностью до 6–7 баллов, эпизодически достигающими магнитуды 3.9. Лёссовый псевдокарст развился здесь по плоскости оползневого смещения [15]. Однако по масштабам сейсмического воздействия, по концентрации, а также по размаху проявления форм лёссового псевдокарста памятник природы на территории Приобья не идет ни в какое сравнение с западной частью Лёссового плато Китая, до сих пор не фигурирующей в перечне особо охраняемых природных территорий страны. ■

5. *Обручев В.А.* Центральная Азия, Северный Китай и Нань-Шань. Отчет о путешествии. СПб., 1900; 1. [*Obruchev V.A.* Central Asia, North China and Nan-Shan. A report on the journey. St.Petersburg, 1900; 1. (In Russ.)]
6. *Richthofen F.* China. Berlin, 1877; 1.
7. *Лавруевич А.А., Крашенинников В.С., Лавруевич И.А.* Лёссовый псевдокарст и опыт укрепления лёссовых массивов и откосов искусственными посадками растений (на примере Лёссового плато в провинциях Ганьсу и Шэнси, Китай). Инженерная геология. 2012; 1: 44–54. [*Lavrusevich A.A., Krashennnikov V.S., Lavrusevich I.A.* Loess pseudokarst and experience of stabilizing loess massives and slopes with artificial plantings (by the example of the Loess Plateau in the provinces of Gansu and Shanxi, China). Engineering Geology. 2012; 1: 44–54. (In Russ.)]
8. *Кригер Н.И., Аleshин А.С., Котельникова Н.Е.* Руководство по изучению геологических процессов в лёссовых грунтах при инженерных изысканиях. Лёссовый псевдокарст. М., 1976. [*Krieger N.I., Aleshin A.S., Kotelnikova N.E.* Guide to the study of geological processes in loess soils for engineering surveys. Loess pseudokarst. Moscow, 1976. (In Russ.)]
9. *Кригер Н.И., Ботников В.И., Лавруевич А.А. и др.* Псевдокарст в лёссовых породах. Геоморфология. 1983; 3: 79–84. [*Krieger N.I., Botnikov V.I., Lavrusevich A.A. et al.* Pseudokarst in loess. Geomorphology. 1983; 3: 79–84. (In Russ.)]
10. *Трофимов В.Т.* Инженерная геология массивов лёссовых пород. М., 2008. [*Trofimov V.T.* Engineering geology of loess soil bodies. Moscow, 2008. (In Russ.)]
11. *Котляков В.М., Комарова А.И.* География. Понятия и термины. М., 2007. [*Kotlyakov V.M., Komarova A.I.* Geography. Concepts and terms. Moscow, 2007. (In Russ.)]
12. *Тимофеев Д.А.* Долинные излучины и их происхождение. Геоморфология. 2010; 3: 3–8. [*Timofeyev D.A.* Valley bights and their origin. Geomorphology. 2010; 3: 3–8. (In Russ.)]
13. *Zhang Y., Mercier J.L., Vergely P.* Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of South China with respect to Gobi-Mongolia. Tectonophysics. 1998; 285: 41–75. Doi:10.1016/S0040-1951(97)00170-4.
14. *Deng Q.D., Zhang P.Z., Ran Y.K. et al.* Basic characteristics of active tectonics of China. Science in China. 2003; 46(4): 356–372.
15. Красная книга Алтайского края. Барнаул, 2009; 3. [Red Book of the Altai Territory. Barnaul, 2009; 3. (In Russ.)]
16. *Jeong G.Y., Hiller S., Kemp R.A.* Quantitative bulk and single-particle mineralogy of a thick Chinese loess-paleosol section: implications for loess provenance and weathering. Quaternary Science Reviews. 2008; 27(11–12): 1271–1287. Doi:org/10.1016/j.quascirev.2008.02.006.
17. *Zhang P.Z., Deng Q.D., Zhang G.M. et al.* Strong earthquakes and crustal block motion in continental China. Science in China. 2003; 33: 12–20.

## Pseudokarst in the Loess Plateau: Anomalous Features

A.A.Lukashov

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Within the western part of the Chinese Loess Plateau (Gansu Province, right side of the Yellow River valley) to the northeast from the Lanzhou City there is a region characterized by a presence of anomalous (both by morphology and spatial density) pseudokarst features. Upper layers of loess mantle up to 500 m of the thick are densely incised by closed depressions and tunnel erosion forms in many places, particularly along the erosional banks of deep gorges and gullies. Depth of closed depressions reaches 10 m while diameter does not exceed several meters. There are numerous linear chains of such depressions oriented diagonally relatively to both topographic contours and surface flow lines. Most of the depressions are situated outside the bottoms of gorges and gullies. Regressive incision of fluvial system of the Yellow River right tributaries responsible for the local topographic range of several hundred meters was not affected by the pseudokarst processes, but, in the opposite, created favorable conditions for their development. The most important of the latter is the effective groundwater drainage through the upper loess layers incised by the dense and deep fluvial network. In turn, tunnel erosion features and especially collapses of tunnel roofs result in density increase of the first orders erosion landforms. Such features were initially formed by suffosion and tunnel erosion rather than surface runoff erosion and can be distinguished by the remnants of the former tunnel roofs — peculiar landforms such as pseudokarstic bridges. The remaining sections of cavities formed by tunnel erosion follow the distinctive zones of tectonic fractures. Specific tectonic control of the anomalous loess pseudokarst features may possibly be related to location of the region in the epicentric area of the catastrophic earthquake of 1920.

**Keywords:** pseudokarst, loess, Loess Plateau, earthquakes, tectonic control.

# Формирование оползней-потоков на отвалах угледобывающих предприятий

К.В.Верховов<sup>1</sup>, С.В.Рыбальченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Областное автономное учреждение «Спортивно-туристический комплекс (ОАУ СТК) «Горный воздух»» (Южно-Сахалинск, Россия)

<sup>2</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (Южно-Сахалинск, Россия)

В работе показан один из наиболее опасных склоновых экзогенных процессов, формирующихся на породных отвалах угледобывающих предприятий, — оползневой поток. Описан механизм его возникновения, движения и аккумуляции, негативное воздействие на объекты и территории, перечислены мероприятия инженерной защиты. Рассмотрены факторы активизации (антропогенные, метеорологические, гидрологические, гидрогеологические и геологические) оползней-потоков на угольных отвалах.

**Ключевые слова:** оползень-поток, породный отвал, техногенный ландшафт, техногенные грунты, водноугольные суспензии.

**П**роизводственные процессы многих горнодобывающих предприятий сопряжены с обработкой значительных объемов горных пород: их разрыхлением, добычей, сортировкой, перевозкой, складированием и при необходимости с дальнейшей переработкой. Антропогенному воздействию подвергаются значительные территории, площади которых могут достигать нескольких тысяч квадратных километров, а объемы складирования — составлять десятки и сотни миллионов кубических метров. На данных территориях нарушаются естественные природные и образуются особые техногенные ландшафты, представленные различными элементами рельефа антропогенного происхождения: карьерами, породными отвалами, терриконами, хвостохранилищами, техногенными пустынями и др.

Техногенные ландшафты, в отличие от природных, не подвержены многолетним гравитационным преобразованиям рельефа и характеризуются существенным увеличением стока. Последнее связано с отсутствием транспирации (движения воды через растение и ее испарения) и ослаблением редукции в пределах водосборных бассейнов, вызванных

уничтожением растительности и почвенного покрова. Техногенные грунты, которые участвуют в формировании подобных ландшафтов, отличаются снижением жестких структурных связей, а из-за применения во время добычи и вскрышных работ буровзрывных и механических способов разрыхления горных пород характеризуются повышенным содержанием тонкодисперсных пылеватых частиц. Техногенные грунты активно вовлекаются в опас-



**Константин Владимирович Верховов**, инженер ОАУ СТК «Горный воздух». Специалист в области контроля опасных склоновых процессов, инженерной защиты, строительства, открытых горных работ.  
e-mail: konstantin\_verhovov@mail.ru



**Светлана Владимировна Рыбальченко**, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории контроля и изучения опасных геодинамических процессов и снежного покрова в геосистемах переходных зон Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН. Область научных интересов — селевые процессы.  
e-mail: rybalchenko\_sv@mail.ru

ные склоновые экзогенные процессы гравитационного, водно-гравитационного и флювиального характера — такие как оползни, обвалы, сели и др.

Наибольшую опасность представляют внешние (вынесенные за пределы горных выработок) породные отвалы и хвостохранилища, обладающие значительным запасом потенциальной энергии, который обусловлен их расположением, планировкой, высотными отметками и значительным объемом. Особо стоит отметить породные отвалы угледобывающих предприятий. Помимо больших объемов складирования для них характерен длительный период эксплуатации. Во время освоения месторождений рекультивация горных выработок и отвалов невозможна. Проявления экзогенных процессов на породных отвалах здесь могут вызвать катастрофические последствия.

### Катастрофы на угольных отвалах

Случаи формирования опасных склоновых процессов на породных отвалах угледобывающих предприятий весьма распространены. Наиболее известный из них — трагедия в Аберфане, произошедшая 21 октября 1966 г. в Уэльсе (Великобритания)\*.

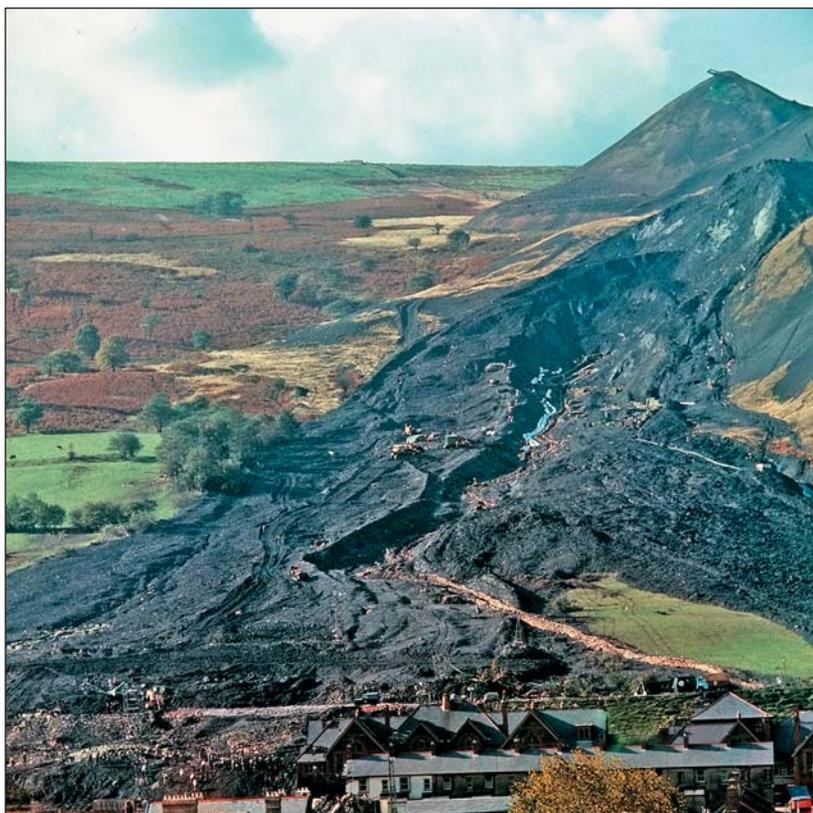
После непрекращающихся многодневных проливных дождей на породном отвале шахты Мэртир Вэйл (Merthyr Vale), который расположен на склоне горного хребта Минид Мэртир (Mynydd Merthyr), сошел крупный оползень объемом 150 тыс. м<sup>3</sup>. Обводненные техногенные грунты, которые складываются в неблагоприятных гидрогеологических условиях уже более 50 лет, пришли в движение и со скоростью 30 км/ч устремились к подножию склона, где располагалась деревня Аберфан. На пологих участках по пути схода оползневых потоков произошло частичное отложение материала и снижение скорости движения до 15 км/ч. Оползневые массы, достигнув улиц Аберфана, погребли 20 жилых домов и здание начальной школы. Несмотря на то что спасательная операция началась сразу же после остановки оползня и к ней были привлечены значительные ресурсы, живыми из-под завалов удалось извлечь только несколько человек в первый час операции. Жертвами

этого стихийного бедствия стали 144 местных жителя, в том числе 116 детей в возрасте от 7 до 10 лет. Трагедия в Аберфане заставила существенно изменить законодательство Великобритании в сфере недропользования, которое ранее не регламентировало деятельность угледобывающих предприятий на внешних породных отвалах.

В последнее время на территории РФ в связи со значительным увеличением объемов добычи угля (свыше 400 млн т в год) также отмечались многочисленные проявления опасных склоновых процессов на породных отвалах.

1 апреля 2015 г. крупный оползень-поток объемом 27,5 млн м<sup>3</sup> сошел с отвала угольного разреза «Заречный» (Кемеровская обл.). В результате обрушения отвала вскрышных пород были повреждены опоры линии электропередачи, обесточены объекты на территории предприятия, под завалами оказалась двухпутная железнодорожная ветка и автомобильная дорога, множество единиц подвижного транспортного состава, склады и строения, а также было засыпано русло р.Кыргай [1].

14 мая 2018 г. в с.Горнозаводск (Сахалинская обл.) оползень-поток объемом 500 тыс. м<sup>3</sup>, который сформировался на породном отвале угледобывающего предприятия, преодолев несколько сот метров по долине ручья, повредил жилой дом и хозяйственные постройки на территории распо-



Оползень-поток в Аберфане. Октябрь 1966 г.

\* [http://wiki.gr-tech.ru/index.php?title=Трагедия\\_в\\_Аберфане](http://wiki.gr-tech.ru/index.php?title=Трагедия_в_Аберфане)



Оползень-поток в с.Горнозаводск. Май 2018 г.

ложенного вблизи фермерского хозяйства. Оползень приостановил движение перед нерестовой р.Лопатинкой, вода которой использовалась и для хозяйственно-питьевого водоснабжения села. Под угрозой экологической и гуманитарной катастрофы оказалось более 4 тыс. человек.

Описанные случаи формирования оползней на породных отвалах демонстрируют негативные механизмы воздействия и поражающие факторы данного явления. Оползневые массы обладают

громдными объемами (до нескольких миллионов метров кубических) и значительным площадным распространением. Они представляют серьезную угрозу для линейных наземных (в том числе инженерных сетей и транспортных магистралей) и водных объектов, для сельскохозяйственных земель и земель лесного фонда, для хозяйственной и жилой застройки, для населения и животных.

Оползневые потоки движутся с небольшими скоростями (от нескольких метров в час до 2–4 м/с). Однако, несмотря на это, люди, особенно маломобильные группы населения, не всегда могут своевременно покинуть зону транзита ополз-

ня. При достаточно высоких плотностях (вплоть до 2.3 т/м<sup>3</sup>) оползневые массы обладают высокой пластичностью, что позволяет им легко проникать внутрь помещений и строений. При попадании человека в оползень-поток шансы на выживание крайне малы.

Формирование крупных оползневых потоков на породных отвалах угледобывающих предприятий зачастую квалифицируется как чрезвычайная ситуация регионального масштаба.

## Механизм развития оползней-потоков на угольных отвалах

Внешние породные отвалы угледобывающих предприятий сложены техногенными грунтами с низким коэффициентом уплотнения и высоким содержанием частиц угольной пыли. В случае складирования пород с нарушением норм по обеспечению устойчивости и водоотведения могут развиваться склоновые экзогенные процессы, для которых техногенные грунты отвалов служат источником твердого питания. Переувлажнение угольной породы способствует формированию сплывов и оползней-потоков, причина возникновения которых обусловлена образованием водноугольных суспензий.

Частицы угольной пыли, обладая тонкодисперсным (от 50 до 300 мкм) составом и отрицательным зарядом, проявляют выраженные коллоидные свойства, активно связывают воду и образуют устойчивые водноугольные суспензии. Подобные суспензии характеризуются насыщенной консистенцией (до 70%) и псевдопластичностью — уменьшением вязкости при увеличении

скорости движения. На сегодняшний день физика подобных консистентных сред недостаточно изучена. Систематические данные по динамике высоконаполненных суспензий (в том числе грунтовых) в области селеведения, механики грунтов и инженерной геологии отсутствуют.

Для оползней-потоков, формирующихся на угольных отвалах, характерны особенности, которые присущи всем оползням глетчерного типа. По механизму формирования их можно отнести к оползням выдавливания, сдвига или разжижения [2]. Как мы уже говорили, оползневые массы движутся с небольшими скоростями, но в теле такого потока присутствует значительный градиент скоростей по глубине. В придонных частях (за счет силы трения о поверхность скольжения) наблюдается довольно сильное снижение скорости, что приводит к взаимному параллельному смещению отдельных слоев и конгломератов. Верхние слои движутся значительно быстрее. В отличие от селей, имеющих выраженный волновой характер движения, поверхность оползневого потока — бу-



Схема движения оползневого потока. Красным показана граница оползня. Внизу — оползневой поток с отвала «Заречный». Апрель 2015 г.

гристая. Форма оползневого тела — эллипсоидная, сильно вытянутая, имеющая веерообразное расширение в зоне остановки.

Предметы, захваченные оползнем в зоне его зарождения, некоторое время движутся по поверхности. Достигнув переднего края (головы оползня), они погребаются. Предметы, находящиеся непосредственно в зоне транзита, сразу оказываются погребенными оползневыми массами.

Относительная влажность оползневых потоков может достигать 20–30%. Большая часть воды внутри оползня в отличие от селя находится в связанном состоянии [3]. И после остановки оползневых потоков интенсивное отделение суспензии, характерное для селевых потоков, не наблюдается [4, 5]. Распад водноугольных суспензий внутри оползневых масс происходит преимущественно не седиментационным путем (оседанием), а радиационным (высушиванием).

В зоне аккумуляции движение оползня-потока постепенно замедляется, и его глубина уменьшается. Теоретически оползневые массы растекаются до тех пор, пока толщина потока не достигнет толщины придонного слоя. В данном случае полная остановка оползня за счет силы трения о поверхность скольжения должна происходить при минимальных уклонах. На практике же, за счет увеличения вязкости наружных слоев при их естественном радиационном осушении полная остановка оползневых масс происходит гораздо раньше достижения потоком толщины придонного слоя.

### **Факторы активизации оползней-потоков на угольных отвалах**

На породных отвалах угледобывающих предприятий выделяются антропогенные, геологические (денудация, эрозия и разжижение слабых оснований горных отвалов, литологический состав и физико-механические свойства вскрышных пород), гидрологические (деятельность постоянных, временных и напорных фильтрационных потоков) и метеорологические факторы, которые способствуют образованию оползневых потоков.

К метеорологическим факторам активизации опасных экзогенных процессов на склонах породных отвалов угледобывающих предприятий относятся явления, увеличивающие относительную влажность и снижающие физико-механические характеристики техногенных грунтов: осадки, весеннее снеготаяние, а также знакопеременные температуры воздуха. Основной механизм их воздействия сводится к разуплотнению и снижению сцепления между частицами грунта вследствие его обводнения, разжижения или разрыхления. Максимальное влияние метеорологические факторы оказывают в районах с гумидным климатом [6].

Наиболее часто к формированию крупных оползневых потоков приводят антропогенные факторы, связанные с ошибками при плановом расположении породных отвалов; неправильное складирование пород на склонах (нагорные отвалы) без обеспечения устойчивости самих отвалов и нижележащих горных пород. Зачастую, даже не смотря на активизацию опасных экзогенных процессов, предприятия продолжают эксплуатацию отвалов, что значительно увеличивает нагрузку на их неустойчивое основание, вызывая развитие оползней сдвига и выдавливания.

Размещение породных отвалов в отрицательных формах рельефа (оврагах, долинах, распадках и др.), которые обладают собственным водосбором и нередко служат руслом постоянных или временных водотоков, приводит к увеличению влажности техногенных грунтов и разрушению откосов отвалов фильтрационными и временными потоками.

Складирование отработанных пород в виде буртов (открытых площадных складов) без обеспечения мер по уплотнению и устойчивости откосов также способствует формированию оползней-потоков. В отличие от терриконов, бурты характеризуются более пологими откосами и значительными горизонтальными проекциями, что обуславливает интенсивное увлажнение горных пород в период дождей или снеготаяния.

К увеличению влажности техногенных грунтов также приводит отсутствие водоотводных канав (в том числе нагорных) и своевременной расчистки снега на площадях складирования, значительный объем которого оказывается погребенным вместе с отработанными породами. В пределах техногенных ландшафтов из-за отсутствия растительного покрова и в связи со значительной энергией рельефа и интенсивным снеготаянием увеличивается поверхностный сток.

Для угледобывающих предприятий характерны существенные объемы выбросов в атмосферу твердой угольной пыли. Благодаря тонкодисперсному составу она разносится на большие расстояния. Оседание и отложение угольной пыли регистрируется в радиусе 10–15 км. Тонкодисперсный состав и отрицательный заряд частиц способствуют их активному накоплению на поверхности снежного покрова в зимний период и препятствуют их сдуванию. В свою очередь, загрязненный угольной пылью снежный покров снижает свое альbedo, что приводит к интенсивному снеготаянию в весенний период. Ситуация усугубляется тем, что угли и углесодержащие вскрышные породы при отрицательных температурах обладают повышенной хрупкостью. Это неизменно приводит к более интенсивному образованию угольной пыли при погрузочно-разгрузочных работах

и транспортировке углей и вскрышных пород. Вблизи угледобывающих предприятий в период весеннего снеготаяния отмечаются значительные паводки и образование верховодки. Повышенное увлажнение грунтов техногенных ландшафтов способствует развитию на их территории опасных склоновых экзогенных процессов.

### **Инженерная защита и ликвидация последствий оползневых потоков**

Несмотря на относительно невысокие скорости движения, оползни-потоки, обладающие значительными объемами и вязкопластичной консистенцией отложений, представляют серьезную опасность. Ликвидация их последствий вызывает значительные трудности. Даже после аккумуляции оползневые массы длительное время находятся в переувлажненном состоянии, что усложняет их погрузку, транспортировку и складирование. Кроме того, существует угроза повторного намочения и разжижения оползневых масс в неблагоприятных гидрологических и гидрогеологических условиях.

Важную роль в снижении негативных последствий оползневых потоков играет геотехнический и геоэкологический мониторинг на объектах складирования горных пород, своевременное оповещение и эвакуация населения при угрозе формирования оползней. Проводятся и превентивные мероприятия — снижение эксплуатационной нагрузки и прекращение складирования на опасных отвалах, их осушение и водоотведение (устройство нагорных канав, отводных каналов и кюветов).

Помимо профилактических мер и полномасштабных мероприятий по эвакуации необходимо своевременно создавать удерживающие и направляющие сооружения, а также стабилизировать оползневые массы с помощью химического осушения и увеличения их вязкости.

Аналогичные меры противодействия успешно применяются в борьбе с лавовыми потоками, имеющими схожую динамику и вязкопластичную консистенцию. Так, в 1973 г. при извержении вулкана Эльдфетль на о.Хеймаэй (Исландия) была проведена беспрецедентная спасательная операция. Используя заградительные дамбы и остужая движущиеся лавовые потоки водой (ее было израсходовано 6,8 млн м<sup>3</sup>), удалось спасти значительную часть городских строений, гавань и портовую инфраструктуру города\*.

В 1983 г. во время извержения вулкана Этна (о.Сицилия, Италия) срочно возведенные из вулканических пород и пепла заградительные дамбы

не дали разрушиться трем городам и инфраструктуре туристической зоны. Спустя 10 лет при очередном извержении Этны направляющие грунтовыми и бетонные дамбы, а также отводные каналы спасли от гибели г.Дзафферана-Этнея с населением свыше 8 тыс. человек.

Данные примеры демонстрируют эффективность срочного создания подобных сооружений в борьбе с движущимися вязкопластичными потоками, в том числе и с оползневыми.

Невысокие скорости движения позволяют возводить на пути следования оползней-потоков направляющие и удерживающие дамбы гравитационного действия из доступных материалов: местных и привозных грунтов природного или техногенного происхождения, строительного лома, тяжелых железобетонных и металлических конструкций, подвижного состава и др.

Заложение по пути следования разрушительного потока канав и приемных котлованов, значительно увеличивающих трение оползневых масс в придонных слоях и снижающих их глубину, также способствует замедлению и даже остановке оползня. Осушение же оползня-потока путем устройства дрен и кюветов не может служить эффективной мерой, поскольку вода внутри тела оползня находится преимущественно в связанном состоянии. Наиболее перспективно естественное радиационное и химическое осушение верхних слоев оползневых масс, в которые вводятся жидкие и порошкообразные стабилизаторы в количестве 2–5% по массе. В качестве стабилизаторов используются структурообразующие добавки на основе цемента и извести, а также гидрофобизаторы ПАВ различного спектра действия (анионные, катионные, универсальные). Помимо улучшения физико-механических свойств оползневых масс (снижения влажности, увеличения вязкости, образования жестких структур и др.) стабилизаторы, в том числе комплексные и гидрофобизаторы, способствуют скорейшему радиационному осушению и предотвращают повторное переувлажнение и разжижение техногенных грунтов. Наиболее перспективен метод цементации, используемый для укрепления водонасыщенных илов и сапоредей с последующим образованием грунтобетона.

Эффективна и экономически целесообразна лишь стабилизация верхних слоев оползневых масс в голове оползня, которая приводит к остановке движения всего потока.

Складировать выносы оползневых потоков с угледобывающих предприятий необходимо в благоприятных условиях, по возможности максимально рационально используя рельеф местности, на оборудованных площадках с устройством упорных банкетов из грунтов, габионных (контей-

\* <http://vulkania.ru/istoricheskie-izverzheniya/izverzhenie-na-ostrove-heymaey-v-1973-godu-kak-rodilsya-vulkan-eldfedl.html/>

неры из сетки, заполненные камнями) или армогрунтовых конструкций, которые будут препятствовать растеканию и повторному образованию разрушительных оползней-потоков.

\* \* \*

Итак, внешние отвалы угледобывающих предприятий представляют большую опасность. Они коренным образом изменяют и преобразуют природный ландшафт и служат источником загрязнения. Вблизи населенных пунктов породные отвалы ухудшают санитарно-гигиенические условия и эстетическое восприятие. Техногенные грунты отвалов характеризуются низким коэффициентом уп-

лотнения и высоким содержанием частиц угольной пыли, что в случае складирования с нарушением норм устойчивости и водоотведения приводит к развитию опасных склоновых экзогенных процессов. Переувлажнение угольной породы в отвалах способствует развитию сплывов и оползней.

Для снижения негативных последствий оползневых потоков необходимо проводить геотехнический и геоэкологический мониторинг на объектах складирования горных пород, возводить инженерные сооружения, препятствующие движению оползневых масс, своевременно оповещать и эвакуировать население при угрозе образования оползней. ■

## Литература / Reference

1. Коломоец С.Ю. Современные экологические проблемы малых рек Кемеровской области. Аграрная наука — сельскому хозяйству. Барнаул, 2016; 372–373. [Kolomoets S.Yu. Modern ecological problems of small rivers of the Kemerovo region. Agricultural science-agriculture. Barnaul, 2016; 372–373. (In Russ.).]
2. Постоев Г.П., Шеко А.И., Кюнтцель В.В. и др. Изучение режима оползневых процессов. М., 1982. [Postoev G.P., Sheko A.I., Kuntzel V.V. et al. The study of the mode of landslide processes. Moscow, 1982. (In Russ.).]
3. Оползни и сели. Т.1. Ред В.А.Козловский. М., 1984. [Landslides and Mudflows. V.1. Ed. V.A.Kozlovskii. Moscow, 1984. (In Russ.).]
4. Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Этапы формирования селевых бассейнов на склонах морских террас Нагаевской бухты п-ова Старицкого (г.Магадан). Вестник ДВО РАН. 2016; (5): 94–99. [Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V. Stages of formation of mudflow basins on the slopes of marine terraces of the Nagayevskaya Bay of the Staritskogo Peninsula (Magadan). Vestnik of FEB of RAS. 2016; (5): 94–99. (In Russ.).]
5. Рыбальченко С.В. Селевые процессы на склонах морских террас Южного Сахалина. Вестник ДВО РАН. 2013; (3): 52–59. [Rybalchenko S.V. Mudflow processes on slopes of the marine terraces of South Sakhalin. Vestnik of FEB of RAS. 2013; (3): 52–59. (In Russ.).]
6. Полунин Г.В. Экзогенные геодинамические процессы гумидной зоны умеренного климата. М., 1983. [Polunin G.V. Exogenous geodynamic processes of the humid zone of temperate climate. Moscow, 1983. (In Russ.).]

## Formation of Landslides-Flows on Dumps of Coal-Mining Enterprises

K.V.Verkhovov<sup>1</sup>, S.V.Rybalchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sports and tourist complex "Mountain Air" (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

<sup>2</sup>Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far East Branch of RAS (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

The paper shows one of the most dangerous slope exogenous processes forming on the rock dumps of coal-mining enterprises — the landslide flow. The mechanism of its occurrence, movement and accumulation, a negative impact on objects and territories, as well as engineering protection measures are described. The activation factors (anthropogenic, meteorological, hydrological, hydrogeological, and geological) of such flows on coal dumps are considered.

**Keywords:** landslide-flow, rock dump, technogenic landscape, technogenic soils, water-coal suspensions.

# Даниил Гранин и наука: открытие А.А.Любищева и Н.В.Тимофеева-Ресовского

К 100-летию Д.А.Гранина

доктор биологических наук М.Д.Голубовский

Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

e-mail: mdgolub@gmail.com

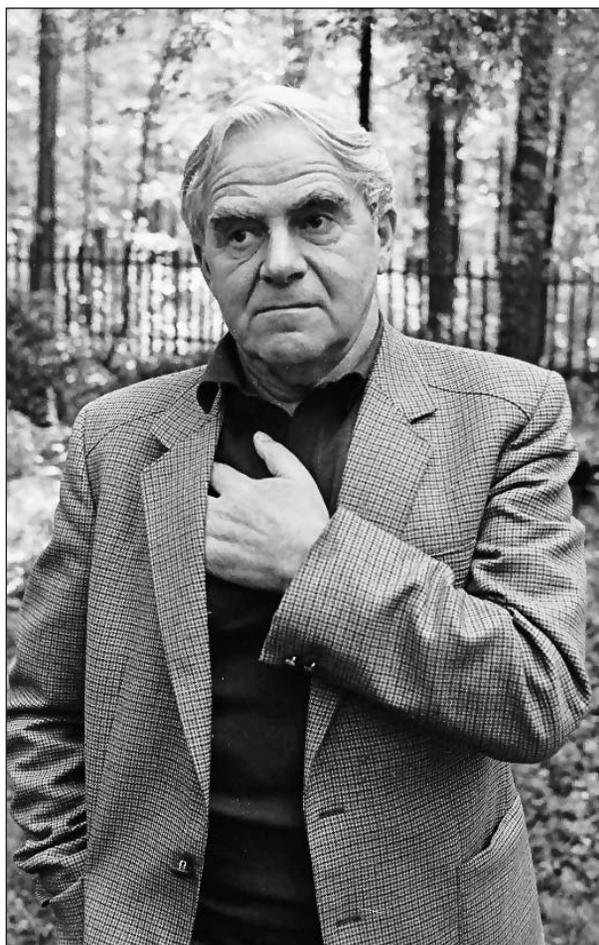
Две наиболее известные документально-художественные повести Д.А.Гранин посвятил выдающимся ученым-биологам — А.А.Любищеву («Эта странная жизнь») и Н.В.Тимофееву-Ресовскому («Зубр»). Выбор героев частично обусловлен тем, что в годы сталинских репрессий самый острый конфликт тоталитаризма и науки был связан именно с биологией. «Как в старину открывали земли, как астрономы открывают звезды, так писателю может посчастливиться открыть человека», — эти слова принадлежат самому Гранину, который открыл для российского общества два разных типа естествоиспытателей, замечательных биологов и удивительных личностей. Это было трудной задачей, если вспомнить время публикации повестей и сопоставить его со взглядами и линиями судеб их героев.

**Ключевые слова:** история науки, Д.А.Гранин, А.А.Любищев, Н.В.Тимофеев-Ресовский.

**Н**аука и личность, наука и общество — эти темы занимали особое место в творчестве Даниила Александровича Гранина. Их почти не было в российской литературе. Здесь писатель стал первооткрывателем, причем, по его признанию, сам чувствовал себя пионером. Об этом говорят и названия ранних повестей Даниила Александровича (Д.А.): «Искатели» (1955), «Собственное мнение» (1956), «Иду на грозу» (1962). В них ощущается романтика творческого поиска в исследовании тайн природы, самостоянье личности, свой путь в науке и жизни. И главное — нерв художественного повествования, неизбежные столкновения человеческих страстей и характеров, когда предстоит нравственный выбор и решается судьба. Повести Д.А. были очень популярны в советские времена и привлекали в науку молодежь. Лауреат Нобелевской премии академик Ж.И.Алфёров рассказывал, что именно чтение книг Гранина окончательно определило его жизненный путь.

## Наука, ее ценности и искушения

Гранин прекрасно знал жизнь науки изнутри. Он учился в аспирантуре знаменитого Политехнического института в Ленинграде, где профессорствовал выдающийся физик и организатор науки А.Ф.Иоффе (1880–1960), создатель знаменитой научной школы. Из школы «папы Иоффе» (так его называли ученики) вышли нобелевские лауреаты П.Л.Капица, Н.Н.Семёнов и Ж.И.Алфёров,



Даниил Александрович Гранин (1919–2017).

известные физики Ю.Б.Харитон (руководитель советского атомного проекта), А.П.Александров (президент АН СССР в 1975–1986 гг.), Я.И.Френкель, И.В.Курчатов, И.К.Кикоин, Б.П.Константинов. Там же восходила яркая звезда гениального астрофизика М.П.Бронштейна [1], но в 1937 г. ученый в возрасте 31 года был арестован и в феврале 1938-го расстрелян\*. Об отчаянных попытках спасти Бронштейна, узнать его судьбу поведала в конце жизни его жена Л.К.Чуковская в повести «Прочерк», которая вышла лишь в 2001 г., уже после ее смерти. На это издание отозвался Алфёров в письме к дочери Чуковской: «Мы потеряли не просто замечательного ученого, писателя, человека, мы потеряли для страны будущее целой научной области» [2, с.1]. Сразу вспоминается сходная судьба Н.И.Вавилова и всей советской генетики\*\*.

В Комарово (литераторском поселке под Ленинградом), где был, по словам Гранина, «свой Академгородок», он общался с самим Иоффе и с математиком В.И.Смирновым. Беседам с ними и с другими известными учеными посвящены страницы мемуарных заметок Д.А. «Причуды моей памяти» (2009). Писателя приглашали и в новосибирский Академгородок (где я проработал 25 лет в Институте цитологии и генетики). Бывая там, Гранин обычно встречался с физиком-теоретиком Ю.Б.Румером, ученым легендарной и трудной судьбы. В начале научного пути он три года (1929–1932) стажировался в Германии в знаменитом Гёттингенском университете. Будучи ассистентом М.Борна (одного из создателей квантовой механики), Румер оказался в центре европейского созвездия физиков. По возвращении в Москву он вскоре стал профессором кафедры теоретической физики в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Но в 1938-м и его настигла вакханалия сталинских массовых репрессий: арест, осуждение на 10 лет по 58-й статье, лагерная «шарашка» (вместе с такими сидельцами, как С.П.Королев, А.Н.Туполев, В.М.Петляков, В.П.Глушков). После 10 лет «шарашки» — пять лет «поражения в правах» и инейская ссылка. Лишь в 1954 г. Румера реабилитировали, и у него появилась возможность работать в новосибирском Академгородке.

Румер был человеком европейской культуры, полиглотом и ироничным рассказчиком околонуточных легенд и баек. Однажды Д.А. поинтересовал-

ся, за что же его посадили, и услышал байку, как в их «шарашку» приехал Берия отметить сдачу проекта. Наркому пожаловался участвующий в застолье итальянец, что его посадили безвинно, ни за что. Берия с чекистским черным юмором ответил: «Если бы было за что, то, дорогой мой, ты бы тут не сидел» [3, с. 61]. В «Причудах моей памяти» есть еще один весьма поучительный рассказ Румера: 14-летний сын одного известного физика, осужденного по 58-й статье, зомбированный советским воспитанием, добровольно написал заявление об отказе от своего отца как врага народа и осуждал свою мать, которая жалеет его отца, — а ведь врагов нельзя жалеть, даже если они твои родители. Через несколько лет отец вернулся после реабилитации с наградой за самолет, созданный в «шарашке». Его именитые друзья-ученые пришли отметить возвращение. А повзрослевший сын в другой комнате рыдал, боясь к ним выйти. Когда жена попросила пойти утешить сына, отец ответил: «Есть огорчения, которых нельзя избегать, надо их пережить полностью, иначе жизнь ничему не научит» [3, с.61].

Жизнь показала, что отказ от общечеловеческих ценностей в пользу классовых или национально-этнических ведет к сходным последствиям. Гранин описывает эпизод начала войны, когда под Ленинградом к ним в полк привели первого пленного немецкого летчика. Узнав, что он из рабочих, солдаты стали через переводчика говорить о рабочей и пролетарской солидарности. Немец-летчик холодно посмотрел на них и презрительно процедил: «Вы все будете уничтожены». Но вот парадокс истории: этническому мифу нацизма противостояли люди, зомбированные столь же безжалостным классовым мифом и идеологией. В годы раскулачивания в одночасье сотни тысяч крепких крестьянских семей с малыми детьми были как враги народа лишены своих домов и имущества и высланы, брошены на смертный произвол в таежные леса и холодное безлюдье Сибири.

Горькие переживания, подобные «румеровскому мальчику», испытывали и продолжают испытывать в стране многие, когда снимаются слои социальной лжи и обнажается правда. Пришлось внезапно освободиться от идолопоклонства, которое насаждалось десятилетиями и застилало глаза. В партийных терминах оно было названо — «культ личности Сталина». Не знаю лучшей метафоры происходившего, нежели в лагерной песне Александра Галича: «Кум докушал огурец / И закончил с мукою: / «Оказался наш Отец / Не отцом, а сукою... / Полный братцы ататуй! / Панихида с танцами! / И приказано статуи / За ночь снять со станций»\*\*\*. В «Причудах моей памяти» писатель

\* Подробнее см., например: *Горелик Г.Е.* Лев Ландау и Матвей Бронштейн // *Природа*. 2008. №1. С.46–53. — *Примеч. ред.*

\*\* В «Природе» много публикаций о Н.И.Вавиллове, в их числе специальный выпуск журнала к 100-летию выдающегося генетика (1987. №10), который можно найти в электронном архиве журнала ([prigoda.ras.ru](http://prigoda.ras.ru)). — *Примеч. ред.*

\*\*\* Строки из «Поэмы о Сталине» (глава 4: «Ночной разговор в вагоне-ресторане»). — *Примеч. ред.*

откровенно поведал о своем сходном освобождении от советских мифов и утопий: «После XX съезда словно развеялись колдовские чары. Действительность стала обретать свои истинные черты. Как я мог не видеть то, что нами правил вовсе не мудрейший в истории человек, что мы ничего сверхъестественного не сумели выстроить, ни социализма, ни благополучия, нищая деревня, бездорожье, коммуналки... что нет у нас ни свободы печати, ни свободы слова, что люди тайком крестят в церкви детей, что мы не можем выезжать из страны, что повсюду царит доноительство, колхозники — форменные крепостные... Как я ничего этого не видел, не понимал. <...> Я терял к себе уважение. Наверное, нечто похожее происходило и с моими друзьями. <...> Это было спасительное разочарование. На время» [3, с.53].

На одной из встреч с читателями, где был и я, Гранина попросили прочесть что-либо из любимых стихов, и он прочел пушкинское «Воспоминание». Поэт в полночной тишине предается воспоминаниям, испытывая «змеи сердечной угрызенья»: «И с отвращением читая жизнь мою, / Я трепещу и проклиная, / И горько жалею, и горько слезы лью, / Но строк печальных не смываю». Не смывать печальных горьких строк, которые есть в жизни каждого, — удел немногих.

Конец 1950-х и 1960-е — времена особых упований и надежд на науку. Торжество разума, атомная энергия, начало полетов в космос. «Мы покоряем пространство и время, мы — молодые строители земли»\*, — громко пели радостным хором. «Мне казалось, — вспоминал Гранин, — что ученые-физики готовят будущее и не позволят вернуть прежние порядки». Но это искушение сциентизмом пришлось оставить. В более поздние годы писатель, продолжая высоко ценить социальную роль науки, склонен был совесть и милосердие ставить выше знания. В 1999 г. Д.А. писал академику В.Л.Гинзбургу: «Человечество не испытывает недостатка в знаниях, оно испытывает недоста-



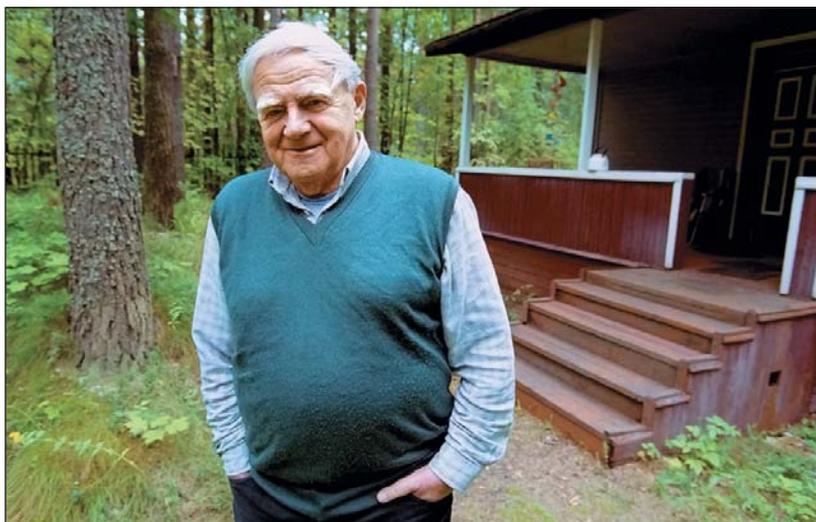
Д.А.Гранин и М.Д.Голубовский в кафе на Петроградской стороне. Санкт-Петербург, 2003 г.

Фото из архива автора

ток доброты»\*\*. В повестях об ученых писателю интересны были прежде всего нравственные и моральные ценности его героев, их поведение и поступки. «Чем выше научный престиж, тем интересней и нравственный уровень ученого» [4, с.31]. Это привлекало к книгам Гранина и читателей.

Я познакомился с Даниилом Александровичем в Ленинграде в конце 1960-х годов в гостях у дочери профессора Любищева, Евгении Александровны. С тех пор и до конца жизни Д.А. мы много общались на социальные, околонаучные и биологические темы. Обычно это происходило во время прогулок от его дома по Малой Посадской улице и по Каменноостровскому проспекту или в сторону Невы и Петропавловки, а также в его летнем домике в Комарово и окрест него.

\*\* Впоследствии это письмо Гранин включил в книгу «Человек не отсюда» (СПб., 2014). — Примеч. ред.



Возле своего загородного дома в Комарово.

\* Слова из «Марша веселых ребят» В.И.Лебедева-Кумача. — Примеч. ред.

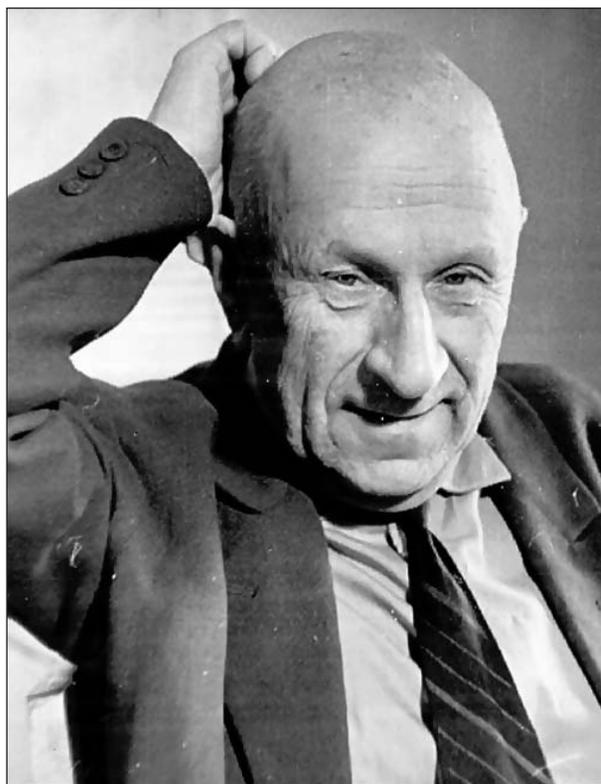
Мы обсуждали оригинальную книгу известного генетика В.П.Эфроимсона «Генетика этики и эстетики», которую удалось выпустить лишь в 1995 г., после смерти ученого. Будучи редактором этого издания, я включил в него как послесловие статью из архива Любищева «Генетика и этика». Эфроимсон и Любищев были друзьями и соратниками в противостоянии лысенкоизму. Однако их эволюционные предпочтения различались. Эфроимсон полностью принимал тезис Дарвина о ведущей роли отбора в эволюции живых организмов. Для Любищева отбор имел подчиненное значение, главное — законы (идеи), ограничивающие многообразие, наподобие законов Менделя. Не отрицая наследственного компонента в поведении, Любищев главные роли все же отводил религии, нравственным учениям или «идеологической наследственности». Эфроимсон был согласен с Любищевым в том, что «отказ от всечеловеческой, космополитической морали есть страшный регресс, и чудовищные следствия такого отказа мы ощущаем в XX в.» [5, с.260]. Гранин приводил в пользу биологических основ доброты строки из пушкинского «Памятника»: «И долго буду тем любезен я народу, / Что чувства добрые я лирой пробуждал». Пробуждать ведь можно то, что уже потенциально заложено в генах. Искусство, поэзия обладают таинством пробуждения, активации этих задатков. Именно этот дар Пушкин ставил себе в особую заслугу. Это же относится и к миру науки. Размышляя о жизни Любищева, Гранин заключал: «Среди высших созданий человека наиболее привлекательные — нравственные ценности. С годами ученики без сожаления меняют себе наставников, мастеров, ученых, меняют шефов, меняют любимых художников, писателей, но тому, кому посчастливилось встретить человека чистого, душевно красивого — из тех, к кому прикрепляешься сердцем, — ему нечего менять: человек не может перерасти доброту или душевность» [4, с.31].

Рассказывая о своих встречах с А.Д.Сахаровым, Гранин восхищался сочетанием у него таланта физика с талантом доброты и совестливости. Нетерпимость к социальному злу у Сахарова соседствовала с толерантностью, мягкостью в общении, умением прощать. «Для меня доброта, — писал Д.А., — это, несомненно, талант, это счастливый дар природы» [3, с.64]. Писатель напомнил, что в 1973 г. 40 академиков, не стесняясь в выражениях, подписали письмо в «Правде», осуждая правозащитную деятельность Сахарова. Его травлей Академия наук надолго опозорила себя. Академики обычно оправдывались: «Нам выкручивали руки». «Действительно, прессовали, на себе испытал, но ведь далеко не все поддавались», — замечал Гранин [3, с.65]. Постыдное письмо отказались подписать Капица, Лихачев, Зельдович,

Гинзбург, Канторович. После горьковской ссылки Сахарову предстояла встреча на одном форуме с авторами позорного письма, и он признался Лихачеву: «Ужасно волнуюсь, наверное, они будут чувствовать себя очень неловко» [3, с.64].

Две наиболее известные документально-художественные повести Гранина посвящены судьбам ученых в области не физики, а биологии: «Эта странная жизнь» — о биологе-эволюционисте Александре Александровиче Любищеве и «Зубр» — о феерической судьбе выдающегося генетика Николая Владимировича Тимофеева-Ресовского. Выбор Гранина частично был связан с тем, что именно в биологии в те годы наблюдался самый острый конфликт тоталитаризма и науки — судьбы многих ученых были трудными, странными, но и интересными для художника.

Эти две повести принадлежат перу зрелого мастера. Их побудительный мотив: «Как в старину открывали земли, как астрономы открывают звезды, так писателю может посчастливиться открыть человека. Есть великие открытия характеров и типов. Гончаров открыл Обломова, Тургенев — Базарова, Сервантес — Дон Кихота» [4, с.3]. Гранин открыл для российского общества два разных типа естествоиспытателей, замечательных биологов и удивительных личностей. Именно открыл! Но это была трудная задача, если вспомнить время, когда повести были опубликованы,



Александр Александрович Любищев (1890–1972).

Фото из архива «Природы»

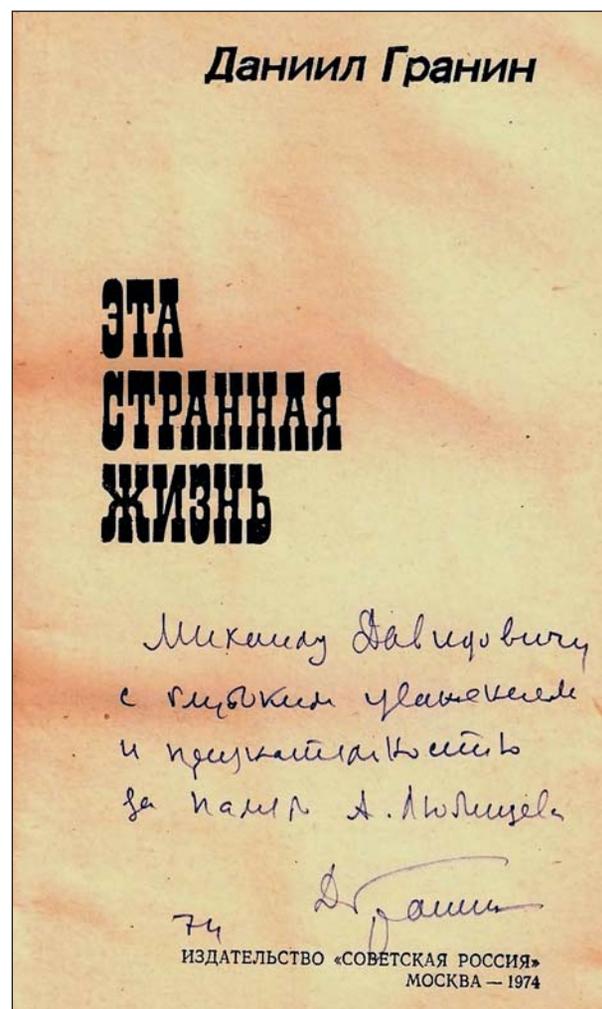
и сопоставить со взглядами и линиями судеб его двух героев. Повесть о Любичеве вышла в 1974 г., когда арестовали и выслали Солженицына «за измену родине». Перед этим началась травля Сахарова за правозащитные действия и публицистику: в 1980 г. его выслали в Горький за критику войны в Афганистане, развязанной старцами из Политбюро (за годы войны погибло около 1.5 млн и стали беженцами около 5 млн афганцев). Железный занавес советских идеологом был крепким.

### Странная жизнь Любичева

До повести Гранина имя Любичева было известно лишь в кругу систематиков, биологов-эволюционистов и тех, кто интересовался применением статистики в биологии. Гранину были известны некоторые его нигде не печатавшиеся научно-публицистические статьи. Любичев, по существу, стал основателем «научного самиздата»: с 1953 г. он пишет серию больших критических антилысенковских статей и посылает их в ЦК на имя Н.С.Хрущева, рассылает копии коллегам и друзьям. Первая статья начиналась словами: «Считаю своим долгом как ученого и гражданина возвысить голос против арачьевского режима в биологии, возглавляемого академиком Т.Д.Лысенко и его сторонниками» [6, с.25]. Любичев анализирует практические, теоретические и философские взгляды лысенкоизма.

История отважного противостояния Любичева обскурантизму, его статьи и письма, а также реакция сообщества появились в печати лишь в 1991 г., спустя 20 лет после его кончины: «А.А.Любичев. В защиту науки». Статьи и письма. Полностью труд «Монополия Т.Д.Лысенко в биологии» вышел, увы, лишь спустя полвека после написания [7]. Самиздатовские статьи и обращения Любичева сыграли невидимую позитивную роль в противостоянии лысенкоизму. Но внешне все оставалось по-прежнему до «малой октябрьской революции» в ноябре 1964 г., когда Н.С.Хрущев был снят со всех постов.

С Любичевым Гранин несколько раз встречался и беседовал, когда ученый, живший в Ульяновске, приезжал в Ленинград к своей дочери. Беседуя с ученым и читая его статьи, Гранин почувствовал масштаб его знаний и собирался съездить к нему в Ульяновск для более тесного общения. Но этого не случилось, а в 1972 г. Любичев ушел из жизни. Однако писатель получил возможность изучить архив Любичева, его дневники и богатое эпистолярное наследие. В повести мы находим признание: «Вскоре я убедился, что не знал Любичева. То есть знал, я встречался с ним, я понимал, что это человек редкий, но масштабов его личности я не подозревал. Со стыдом я признавался себе, что числил его чудачком, мудрым ми-



Титульный лист первого издания книги «Эта странная жизнь» с дарственной надписью Даниила Александровича.

Фото из архива автора

лым чудачком, и было горько, что упустил много возможностей бывать с ним. <...> Диапазон его знаний трудно было определить. Заходила речь об английской монархии — он мог привести подробности царствования любого из английских королей; говорили о религии — выяснялось, что он хорошо знает Коран, Талмуд, историю папства, учение Лютера, идеи пифагорейцев... Он знал теорию комплексного переменного, экономику сельского хозяйства, социал-дарвинизм Р.Фишера, античность и бог знает что еще. Это не было ни всезнайством, ни начетничеством, ни феноменом памяти» [4, с.4, 7].

Наследие Любичева предстало, как контуры уходящего ввысь грандиозного недостроенного сооружения, формы которого были странны и привлекательны. В этих контурах писатель чувствовал замысел, общую систему миропонимания. Второе, что привлекало писателя, — поразительная независимость суждений, еретичность. Будто теория эволюции, взгляды на Достоевского

и Толстого или Нюрнбергский процесс. В стране с идеологемами воинствующего материализма Любищев относил себя к идеалистам в области онтологии и гносеологии, к платоникам. Он отрицал любые схемы «двух лагерей» (например, прогрессивный советский и реакционный буржуазный), следуя тезису своего любимого поэта А.К.Толстого: «Двух станом не боец... и спор с обоими досель мой жребий тайный». В статье «Мысли о Нюрнбергском процессе» он сопоставлял Гитлера и Сталина, нацизм и советский режим, делая вывод: «Злостные преступники должны быть подвергнуты суду во всех странах, как побежденных, так и победивших. Это и будет логическим завершением Нюрнбергского процесса 1945 года. Пока это не будет сделано, пока побежденные будут рассматриваться как преступники, а победители как чистые ангелы, всякие разговоры о разоружении, предотвращении войн, борьбе с расизмом будут бесконечной и лицемерной болтовней» [8, с.143].

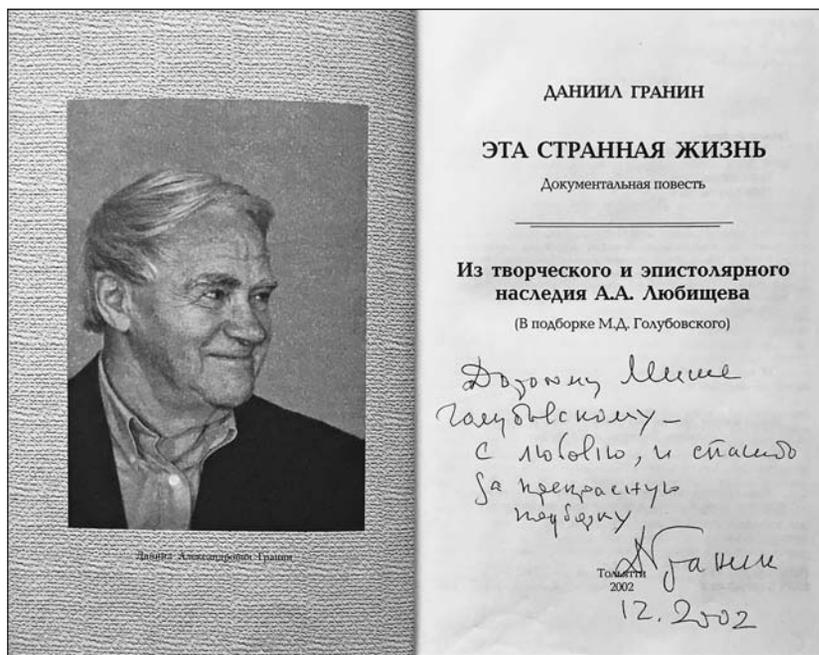
Возникает вопрос, как же в 1974 г., во время ужесточения советского режима и цензуры, Гранин сумел опубликовать повесть о Любичеве с его такими абсолютно несоветскими взглядами и миропониманием. Это стало возможным благодаря мастерски выбранному исповедальному тону, необычному стилю и сюжетной линии повести. По стилю «Эта странная жизнь» напоминает роман Сервантеса «Дон Кихот». Это кажется естественным, ибо Любищев своим поведением и доминированием идеального над материальным напоминает Дон Кихота. Заглавия глав сделаны в стиле романа

Сервантеса. Вот у Сервантеса: «Глава IX, повествующая об исходе и конце необычайного поединка между неустрашимым бискайцем и отважным ламанчцем». И вот у Гранина: «Глава девятая, где автор привычно сводит концы с концами и получает схему, которая могла бы удовлетворить всех». Такой стиль притуплял внимание цензоров.

Другой удачный прием, который облегчил публикацию повести, — сюжетным центром повести сделана Система Времени, по которой жил и работал Любищев. Изучая дневники Любичева, писатель выступил как исследователь, совершив подлинное открытие. Даже близкие не подозревали о той довольно жесткой системе учета времени, которой Любищев следовал. Скажу о себе. Летом 1965-го я гостил у Любичева целую неделю, знакомясь с его статьями, слушая его рассказы, гуляя по Ульяновску и сопровождая его в ежедневных поездках для купания в Свияге. Но я не заметил его следование Системе Времени. Прекрасно сказано в повести: «Его Время не было временем достижения. Он был свободен от желания обогнать, стать первым, превзойти, получить... Он любил и ценил Время не как средство, а как возможность творения. <...> Он твердо верил, что время — самая большая ценность и нелепо тратить его для обид, для соперничества, для удовлетворения самолюбия. Обращение со временем было для него вопросом этики» [4, с. 55].

Гранин на войне был танкистом. Выход его повести — своего рода маневр танка, пробивная мощь которого позволила преодолеть железобетонные цензурные барьеры. Только после выхода повести Гранина под надежной броней его авторитета оказались возможными и публикация в 1982 г. научной биографии Любичева, и выход избранных его работ «Проблемы формы, систематики и эволюции живых организмов». Мне кажется, Д.А. выбрал псевдоним «Гранин» не случайно, в том есть сокрытый смысл: в системе жестких идеологических и цензурных рамок стараться высказываться на *границах* возможного и сужать *границы* запретного. А уже в это свободное пространство, как пехота за танком, проникают другие и расширяют цензурную брешь.

Книга «Эта странная жизнь» продолжает пользоваться популярностью, побуждая к добрым чувствам и деяниям. Вот интересный пример. Любищев похо-



Разворот книги «Эта странная жизнь», переизданной в Тольятти (2002), с портретом Гранина и его дарственной надписью.

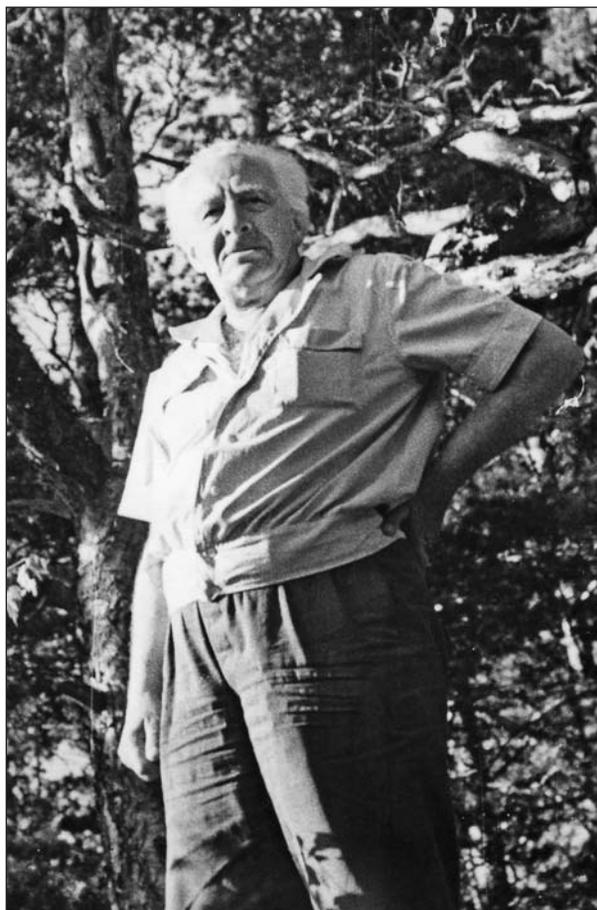
Фото из архива автора

ронен в Тольятти. И вот к 30-летию смерти биолога культурный фонд города «Духовное наследие» задумал переиздать повесть о Любищеве. Инициаторы легко набрали средства по подписке среди деловых людей города и приехали в Ленинград к Гранину за советом. Он предложил при переиздании включить в повесть разные культурологические статьи из архива Любищева. Поскольку я после визита к Любищеву в 1965 г. в шутку получил звание «лорд-хранитель архива», то быстро сделал подборку из статей, интересных широкому кругу читателей. Повесть «Эта странная жизнь» с дополнениями «Из творческого и эпистолярного наследия А.А.Любищева» вышла в 2002 г. в Ульяновске в прекраснейшем полиграфическом исполнении! Даниил Александрович оставил трогательную надпись в дарственном экземпляре: «Дорогому Мише Голубовскому — с любовью, и спасибо за прекрасную подборку. А.Гранин 12.2002».

Повесть «Эта странная жизнь» несомненно способствовала тому, что в 2000 г. в серии «Философы России XX века» были опубликованы два тома работ Любищева: «Линии Демокрита и Платона в истории науки и культуры» и сборник «Наука и религия». Эти книги вышли под редакцией профессора Санкт-Петербургского университета Р.Г.Баранцева, математика и культуролога, которому принадлежит ведущая роль в сохранении и публикации наследия Любищева. В 2008 г. при личной поддержке Гранина и фонда имени Д.С.Лихачева в издательстве «Алетейя» (Санкт-Петербург) вышла книга избранных статей и заметок Любищева под общим названием «Расцвет и упадок цивилизаций» (редакторы и составители — М.Д.Голубовский, Н.А.Папчинская).

### Магический эффект Зубра

Вторым «открытием человека» стала публикация в 1987 г. художественно-документальной повести «Зубр» о Тимофееве-Ресовском, выдающемся биологе, незаурядной личности с парадоксальной и трудной судьбой. Гранин вернул практически запретного ученого в научно-культурное пространство его родной страны. Тимофеев-Ресовский был учеником Н.К.Кольцова — главы московской школы эволюционной генетики и основателя в России исследований по генетике человека. В Москве молодой ученый выполнил классические опыты, установив, как изучать взаимодействие между генами и сложными признаками. Без этих работ трудно теперь представить современное изучение наследственной изменчивости у человека. В 1925 г. Тимофеева-Ресовского пригласили в Германию для продолжения своих исследований. Здесь его разносторонние таланты и знания развернулись в полной мере. Его работы по радиационной генетике, тео-

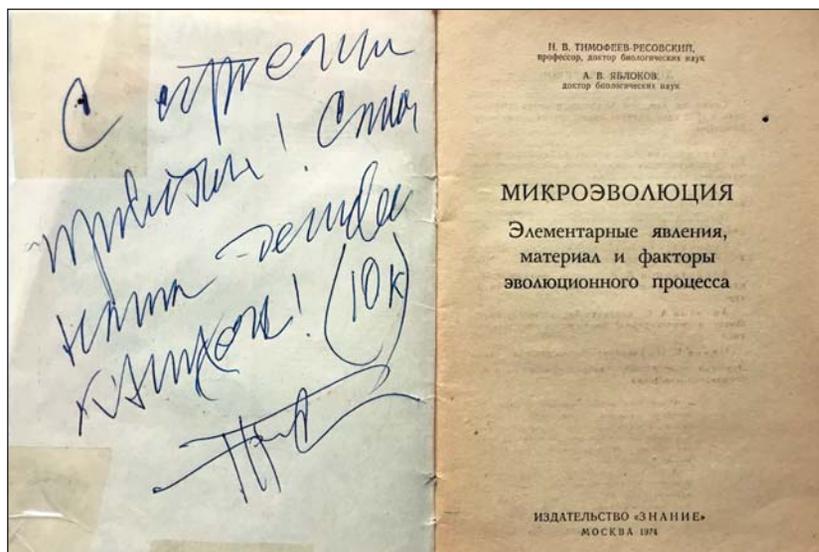


Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский (1900–1981). Биостанция Миассово, лето 1964 г.

Фото Д.И.Бермана

рии гена и мутаций легли в основу возникшей позже молекулярной генетики. Он стал организатором научных мероприятий и ввел в практику европейской биологии регулярные неформальные научные семинары («трепы») с участием Нильса Бора и ведущих генетиков Европы. Исследования Тимофеева-Ресовского по генетике популяций вошли в основные сводки по теории эволюции. К 100-летию Тимофеева-Ресовского в 2000 г. в Дубне было создано международное научное общество «Биосфера и человечество», которое стало собирать международные конференции. Вторая «Тимофеевская» конференция прошла в 2005 г. в Ереване, третья — в 2010 г. в Крыму, где я был организатором секции эволюции и сделал доклад об идеях ученого [9].

Но жизненный путь Тимофеева-Ресовского был сопряжен с личными трагедиями, перекорен социальными катастрофами XX в. и погромом генетики в СССР (лысенкоизмом). В 1937 г. Тимофеев-Ресовский отказался вернуться в СССР на неминуемую гибель. Два его родных брата были арестованы и расстреляны в СССР. В Германии его старший сын в 1943 г. попал в концлагерь за антифашистскую деятельность и погиб в 1945 г. Как



Титульный лист научно-популярной книжки «Микроэволюция», написанной Тимофеевым-Ресовским в соавторстве с А.В.Яблоковым, с дарственной надписью Николая Владимировича. После концлагеря из-за истощения от голода и пеллагры он почти потерял зрение — читал с трудом и только с лупой, а писал «на ощупь». Тем не менее надпись, сделанная с характерным для него юмором, можно разобрать: «С сердечным приветом! Стоит наша дешевая книжонка (10к)! Т-Р».

Фото из архива автора

и ряд других выдающихся ученых (Ф.Г.Добжанский, В.Н.Ипатьев, А.Е.Чичибабин, Г.А.Гамов), Тимофеев-Ресовский входил в категорию «невозвращенцев». Тогда невозвращение в страну приравнивалось к измене Родине. Ученый продолжал свои исследования в Германии до прихода советской армии, желая потом работать в СССР и передать все ценное оборудование лаборатории. Однако он попал в жернова сталинской карательной системы, был осужден на 10 лет, заключен сначала в концлагерь, затем, будучи почти при смерти, переведен в «шарашку» на Урал, где работал по закрытой радиобиологической тематике. Лишь в 1955 г. с него была снята судимость, и он получил возможность ездить по стране. С 1964 г. Тимофеев-Ресовский стал работать в Обнинске и там же, на родной калужской земле, жил до кончины. Он был избран членом многих академий и научных обществ мира, награжден премиями и медалями. Однако его никогда не выпускали за рубеж. Такова краткая жизненная канва.

Обо всем этом подробно было впервые рассказано советским читателям в повести «Зубр». Писатель много лет общался с Тимофеевым-Ресовским, прослушал километры пленок его записанных воспоминаний. Он вел активную переписку, делал запросы в архивы и встречался с людьми, связанными с ученым, ездил специально в Германию. Было сложно не только воссоздать извивы судьбы Тимофеева-Ресовского и его уникальный психологический портрет. Предстояло к тому же провести

через советские цензурные сети повесть об осужденном ученом-«невозвращенце», которого к тому времени еще не реабилитировали. Советская реальность была такова, что и через 20 лет после войны в анкетах сохранялся пункт, «были ли вы или ваши родственники в оккупации».

Гранин вновь совершил «танковый прорыв» и своим писательским авторитетом и мастерством проложил путь для других публикаций и исследований судьбы и научного наследия Тимофеева-Ресовского.

Помню, в 1987 г. Д.А. позвонил мне и попросил прийти на обсуждение его повести «Зубр» в ленинградском Доме писателей. Гранин хотел, чтобы в поддержку повести выступил генетик. У меня, как назло, накануне выдрали два зуба, рот кровоточил, но я, не задумываясь, пошел и выступил. Лишь в 1992 г.,

через 12 лет после смерти ученого, удалось добиться его полной юридической реабилитации в трудном противостоянии с советскими ортодоксами, демагогами и «газетными патриотами».

Теперь о главном и, может быть, наиболее интересном для художника — о психологическом облике Тимофеева-Ресовского. Все в нем — энергия громового голоса, раскованный, свободный стиль общения, красочные рассказы и «трепы», хлесткие присловья — производило завораживающий и прямо-таки магический эффект. Феерическая комбинация европейских манер, шарма и внутреннего достоинства в сочетании с молодецкой удалью былинного русского богатыря — «раззудись, плечо, размахнись, рука!». Выбранная Граниным метафора «Зубр» прекрасно передает и облик ученого, и тягу к нему молодежи: «Он взламывал правила, пугал, от него веяло дикостью, и это тянуло к нему. Он был, как зубр... среди домашнего стада; зверь эпохи двадцатых годов, о которых они знали меньше, чем о декабристах» [10, с.114]. Тимофеев-Ресовский был заводилой в любой компании и даже в стенах Бутырской тюрьмы сумел организовать биологический семинар. В его уникальной по лексикону и экспрессии речи ясность и глубина описания биологических явлений соседствовали с метафорами, терпкими «приколами». Его девиз: «Никакой звериной серьезности».

Тимофеев-Ресовский вмещал в себя три мира. В нем сочетались дореволюционная дворянская культура, университетские традиции с европей-

ской экспериментальной наукой. При этом, как особо подчеркивает Гранин, ученый никогда не прогибался и оставался верен себе — и в нацистской Германии, и при сталинском режиме. В Германии он спасал лиц «неарийского происхождения», а на Урале брал на работу в лабораторию в «шарашке» тех, кто сидел с ним и за кем еще продолжали вести наблюдение «органы».

Настоящим потрясением в научном сообществе Москвы стала лекция Тимофеева-Ресовского, прочитанная им 8 февраля 1956 г. по приглашению академика И.Е.Тамма на знаменитой «среде» в Институте физических проблем у П.Л.Капицы. Сначала Тамм сообщил новости об открытии двойной спирали ДНК как материального субстрата наследственности самовоспроизведения хромосом и генов. Затем Тимофеев-Ресовский рассказал о проведенных в Германии исследованиях механизма мутаций под действием облучения и об определении размера гена. Ни в одном биологическом институте доклад на такую тему был в то время немыслим. Все институты находились еще под контролем лысенковцев. «Одни физики пользовались автономией», — справедливо замечает Гранин.

Известие об этом семинаре взбудоражило научное сообщество Москвы, ведь впервые перед всеми должен был выступить ученый, о котором ходили разные легенды и слухи. В замороженной атмосфере тех лет, хотя и с признаками оттепели, его появление в Москве было подобно комете. На семинар пришло более 800 человек, и пришлось организовать трансляцию вне зала. Молодежь истомилась по современной генетике. «Впервые за много лет открылся блистательный мир новых идей, движение мировой мысли — все то, что так долго скрывали. Генетический “капичник” стал событием не только для Москвы, новость восприняли как выход научной генетики из заключения, как прецедент, как благую перемену», — заключил Гранин [10, с.120].

Д.А. цитирует посвященные Зубру замечательные строки из стихов Л.А.Блюменфельда, заведующего кафедрой биофизики МГУ (Тимофеев-Ресовский называл его одним из самых умных людей, которых встречал): «Ведь человек и суетен, и грешен, / Не отличает в слепоте своей / Немногие существенные вещи / От многих несущественных вещей. / Чему Вы только нас не обучали! / Но если все до афоризма сжать, / То главное — и в счастье, и в печали / Существенное в жизни отличать» [10, с.115].

Теперь о двух вопросах, который задавали и задают многие люди, прочитавшие повесть «Зубр». Почему Тимофеев-Ресовский не эмигрировал из гитлеровской Германии и почему он сам не подавал прошения о реабилитации и вообще не хотел говорить на эту тему. Конечно, ответить на эти во-

просы логически трудно — скептиков ответы не убеждают. Но одна метафора позволит представить сложность ситуации. Назову ее так: «Капитанская дочка» и Тимофеев-Ресовский. Повесть Пушкина все изучали в школе. Кажется, это самая таинственная повесть, ее смысл продолжают анализировать. Однако один глубинный смысл для меня очевиден: случайность, рок, вихрь непредсказуемых событий могут вмешаться в судьбу человека, втянуть его в свою воронку и поставить в самые невероятные обстоятельства. Сбить с пути и закрутить, как снежная метель, в которую попал Гринев, едучи по бескрайней оренбургской степи.

Гринев, невольник чести, волею рока был не только помилован самозванцем, злодеем и убийцей Пугачевым. Он пирует с ним и принимает от злодея подарки — лошадь, шубу, деньги. И поэтому на военном суде Гринева резонно спрашивают: «Отчего произошла такая странная дружба и на чем она основана, если не на измене или по крайней мере на гнусном и преступном малодушии?». Гринев не может логически ответить и оправдать свое поведение. Но мы, читатели, знаем, что он невиновен, что он хотел спасти честь и жизнь любимой девушки, невесты и поступал странно вовсе не из малодушия или измены. Но его приговорили к казни. И только чудо, милосердие императрицы спасло ему жизнь.

Метафора «Капитанской дочки» показывает слабость простой бело-черной дихотомии. Физик-атомщик Л.А.Арцимович, сообщает Гранин, при встрече в 1945 г. в Германии не подал руки униженному и обескураженному Тимофееву-Ресовскому. «В тот год я тоже не подал бы руки русскому, который работал у немцев. В тот год непримиримость жгла нас. Огонь войны очистил наши души, и мы все не желали никаких компромиссов. <...> Мы парили над всеми сложностями жизни» [10, с.94].

Но ведь Зубр приехал в Германию за 16 лет до войны по приглашению и оставался там гражданином СССР. В 1937 г. он не мог вернуться — его ждала верная смерть. Он был советским подданным в Германии и не хотел быть в статусе эмигранта в любой другой стране. В нацистской Германии не было такого тоталитарного контроля за научными институтами, как в СССР. А до 1941 г. ряд исследований, в том числе и те, которые делал Зубр, велся на международные или американские научные гранты. Кроме того, как глава крупной слаженной лаборатории, Тимофеев-Ресовский был в ответе за судьбы своих сотрудников, которые с ним работали долгие годы. Самому уехать, бросив сотрудников и коллег на произвол, — разве это не малодушие?

В 1939 г. вообще был подписан договор о дружбе между Германией и СССР. В Берлине стали продаваться газеты «Правда» и «Известия», в Берлин

приезжали культурные и научные делегации, и их члены посещали лабораторию Зубра. Показателен отрывок из речи Молотова на сессии Верховного Совета, который приводит Гранин в «Зубре»: «Мы всегда были того мнения, что сильная Германия является необходимым условием прочного мира в Европе... Германия находится в положении государства, стремящегося к скорейшему окончанию войны и к миру, а Англия и Франция... стоят за продолжение войны» [10, с.66].

Но произошла внезапная катастрофа — война 1941-го, она стала катастрофой и для Зубра. В 31-й, самой драматичной главе книги Гранин воссоздает психологические терзания Тимофеева-Ресовского после ареста его старшего сына: Фома был схвачен гестапо за участие в антифашистской организации и брошен в концлагерь «Маутхаузен». «Возмездие настигло его. Неумолимое возмездие» [10, с.81]. И вот, видимо, это ощущение настигшего рока от-

вращало Тимофеева-Ресовского от просьб о реабилитации и от всех разговоров на эту тему.

\* \* \*

Гранин пытался раскрыть поэзию научной работы. Эта тема почти не существовала в литературе. Он писал о людях талантливых, одержимых своей идеей, независимых в условиях, когда пресс идеологии сминал и деформировал человека. В интервью американскому интернет-журналу «Чайка» (Seagull magazine) писатель признался: «Жизнь завершается, а ведь я ее начинал тоже безумной и отчаянной надеждой, что мои книги что-либо могут изменить, добавить правды и справедливости в нашей жизни»\*. Думаю, Даниил Александрович Гранин достиг этой цели, насколько это вообще возможно для художественного творчества. ■

\* [www.chayka.org/node/2018](http://www.chayka.org/node/2018)

## Литература / References

1. Горелик Г.Е., Френкель В.Я. Матвей Петрович Бронштейн (1906–1938). М., 1990. [Gorelik G.E., Frekel V.Y. Matvei Petrovich Bronstein. Moscow, 1990. (In Russ.)]
2. Чуковская Л.К. Прочерк. Сост. Е.Ц.Чуковская. М., 2009. [Chukovskaya L.K. Dash. Chukovskaya E.Ts. (ed.). Moscow, 2009. (In Russ.)]
3. Гранин Д.А. Причуды моей памяти. М., 2009. [Granin D.A. Quirks of My Memory. Moscow, 2009. (In Russ.)]
4. Гранин Д.А. Эта странная жизнь: Документальная биографическая повесть об А.А.Любищеве. М., 1974. [Granin D.A. This is a Strange Life: A Documentary Biographical Story about A.A.Lyubishchev. Moscow, 1974. (In Russ.)]
5. Эфроимсон В.П. Генетика этики и эстетики. СПб., 1995. [Efroimson V.P. Genetics of Ethics and Aesthetics. St. Petersburg, 1995. (In Russ.)]
6. Любищев А.А. В защиту науки: Статьи и письма. Ред. М.Д.Голубовский. Л., 1991. [Lyubishchev A.A. In Defense of Science: Articles and Letters. Golubovskii M.D. (ed.). Leningrad, 1991. (In Russ.)]
7. Любищев А.А. Монополия Т.Д.Лысенко в биологии. М., 2006. [Lyubishchev A.A. T.D.Lysenko's Monopoly on Biology. Moscow, 2006. (In Russ.)]
8. Любищев А.А. Мысли о Нюрнбергском процессе (филос. эссе от 1965 г.). Звезда. 1991; 2: 132–144. [Lyubishchev A.A. Thoughts on the Nuremberg Process (philosophical essay from 1965). Zvezda. 1991; 2: 132–144. (In Russ.)]
9. Корогодина В.Л. Конференция «Современные проблемы генетики, радиобиологии, радиоэкологии и эволюции», посвященная памяти выдающихся генетиков и радиобиологов Н.В.Тимофеева-Ресовского, В.И.Корогодина, В.А.Шевченко. Вестник ВОГиС. 2010; 14(4): 747–752. [Korogodina V.L. The conference «Modern problems in genetics, radiobiology, radioecology and evolution» memorizing the outstanding genetics and radiobiologist N.V.Timofeeff-Ressovsky, V.I.Korogodin, V.A.Shevchenko.2010; 14(4): 747–752. (In Russ.)]
10. Гранин Д.А. Зубр. Л., 1987. [Granin D.A. The Bison. Leningrad, 1987. (In Russ.)]

## Daniil Granin and Science: the Discovery of A.A.Lyubishchev and N.V.Timofeev-Ressovsky To the 100th anniversary of D.A.Granin

M.D.Golubovskii

Saint Petersburg Branch of Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS (Saint Petersburg, Russia)

D.A.Granin devoted his two most well-known documentary novels to eminent biological scientists A.A.Lyubishchev (“This Strange Life”) and N.V.Timofeev-Ressovsky (“The Bison: A Novel about the Scientist Who Defied Stalin”). The choice of heroes was partly caused by the fact that during the years of the Stalinist repressions the most acute conflict of totalitarianism and science was observed exactly in biology. “Just as the far lands were discovered in ancient times, and stars were discovered by astronomers, so a writer can be lucky to discover a man”. These words belong to Granin, who discovered for the Russian society two different remarkable types of natural scientists, biologists and amazing personalities. It was a difficult task, if we remember the publishing time of these novels, and compare it with the views and fates of his two heroes.

**Keywords:** scientific history, D.A.Granin, A.A.Lyubishchev, N.V.Timofeev-Ressovsky.

# Более полувека с «Природой»

доктор физико-математических наук М.В.Родкин<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (Москва, Россия)

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (Южно-Сахалинск, Россия)

<sup>3</sup>Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Россия)

Уже более 50 лет назад, в далеком 1968 г., ныне хорошо известный сейсмолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор Андрей Алексеевич Никонов опубликовал в журнале «Природа» свою первую статью\*. И с того времени, постоянно выступая на этом поприще, он написал для данного журнала аж 83 статьи. Других столь же плодovitых авторов в анналах «Природы» не значится, во всяком случае на современном этапе.

Ученых много больше, чем популяризаторов науки. А хороших популяризаторов — еще меньше. Непросто писать для серьезного научно-популярного журнала. Здесь возможно несколько подходов. Первый — пожалуй, более простой — состоит в том, чтобы понятным языком, без употребления узкоспециальных терминов и молчаливо предполагаемых исходных положений объяснить образованному человеку из другой области, что делается в вашем научном огороде. Это полезно тому, кто читает — расширяет кругозор, дает возможность узнать о новом в профессионально незнакомой ему области науки. Это полезно и пишущему — простыми словами, на пальцах, объяснить (хотя бы даже только самому себе) смысл последних результатов в своей области науки. Это дорогого стоит. Но возможен и другой путь — когда пишущий стремится говорить не о надежно установленном, а о пока еще проблематичном, не доказанном, но весьма важном. Здесь популяризатору приходится демонстрировать не уже готовый научный результат — некое роскошное новое блюдо, результат хитрого процесса научных изысканий, — а кухню процесса, показывать ход научного поиска изнутри, аргументировать читателю все про и контра, раскрывать, почему так, а не иначе. Такой подход намного сложнее. И он редко полностью реализуется. Ученые ведь только люди, им трудно (да почти невозможно) быть абсолютно беспристрастными. Своя модель всегда ближе, дороже. Она неизменно будет аргументирована лучше и полнее, чем альтернативная.

Но даже и с этой поправкой подобные публикации весьма интересны читателю.

В первых своих статьях Андрей Алексеевич повествует о дальних путешествиях или доступным широкому читателю языком рассказывает о современных научных представлениях тектоники плит\*\*. Но постепенно темперамент исследователя и поисковая научная активность берут верх. Его публикации перестают быть популярным пересказом установленных положений, а становятся скорее научными эссе, почти художественно показывающими поиск автора. Изложение фактического материала причудливо переплетается с лирическими и историческими отступлениями и аргументами. И немудрено, что довольно часто по одному и тому же вопросу Андрей Алексеевич писал несколько статей: более красочную и популярную — для «Природы», академически сдержанную, с требуемыми ссылками и пояснениями, — для узко профессионального издания.

Спектр затронутых Андреем Алексеевичем проблем широк. Сам он, по крайней мере применительно к сейсмологии, отмечает в качестве главных направлений своих исследований проблемы сейсмической опасности и выделение более активных (чем это принято считать) и менее активных (чем это полагают) территорий. Эта тематика базируется на изысканиях в области истории сейсмических катастроф, на развитии методов макросеймики, палео- и археосейсмологии и на уточнении каталогов землетрясений. Затрагивались им и некоторые стороны прогноза сильных событий. Все эти вопросы, весьма важные в свое время, актуальны до сих пор. Знакомясь с этими публикациями, читатель «Природы» ощущал себя свидетелем, даже в какой-то мере участником проводимых здесь и сейчас научных изысканий.

Остановимся на некоторых из обсуждавшихся вопросов, наиболее интересных не только автору этой заметки, но и читателям «Природы». К особо

\* Никонов А.А. Озеро Шива в Афганистане (1968. №4. С.102–108).

\*\* Никонов А.А., Никонова К.И. Разлом Сан-Андреас предостерегает (1973. №12. С.27–35).



Отряд сотрудников Института физики Земли АН СССР на Камчатке. Путь на Камчатском мысу возможен только на вездеходе при отливе, по кромке берега. 1969 г.

Здесь и далее фото из архива А.А.Никонова

важным и при этом остро дискуссионным вопросам, несомненно, относится многократно поднимавшаяся Андреем Алексеевичем проблема сейсмической опасности/безопасности. Принципиальная трудность ее решения состоит в том, что сильнейшие землетрясения в одном и том же районе, на определенной сейсмогенерирующей структуре происходят весьма редко (скажем, раз в сотни или тысячи лет). Но именно при таких сильнейших событиях выделяется большая часть суммарной энергии землетрясений, и именно такие редчайшие события наносят основной ущерб. Сейсмология за XX в. сделала громадный шаг вперед. Была создана единая всемирная сеть сейсмостанций, заработали региональные сети, обеспечивающие поступление более детальной информации. Огромные ее объемы непрерывно обрабатываются самыми изощренными методами в мировых и региональных центрах анализа данных. Аналогичных сетей нет ни для каких иных видов природных и техногенных опас-

ностей. И только для землетрясений имеются стандартные инструментальные каталоги с начала прошлого века. Но все эти усилия оказались недостаточными, чтобы решить проблему прогноза землетрясений, и даже для того, чтобы надежно оценить уровень сейсмической опасности на разных территориях. Этот вопрос неоднократно поднимался на страницах «Природы»\*.

Неспособность системы наблюдений с необходимой точностью охарактеризовать сейсмическую угрозу четко видна в сложившейся традиции регулярного (раз в 10–20 лет) пересмотра карт сейсмической опасности. Подобный пересмотр необходим, так как систематически в том или другом районе происходят землетрясения, существенно более сильные, чем это предполагалось и отражалось в официальных документах (на картах сейсмического районирования и в списках сейсмической опасности для населенных пунктов). Такие землетрясения воздействовали на инфраструктуру, не рассчитанную на столь мощные события, и ущерб от них нередко оказывался намного выше среднего. Значительная часть наиболее разрушительных землетрясений относится именно к этим — неожиданным — событиям. Таковы, например, повлекшие наибольшее число жертв в СССР и в России Ашхабадское (1948)\*\*, Спитакское (1988), Нефтегорское (1995) землетрясения с общим числом жертв до 150 тыс. человек (по оценкам, проведенным Никоновым). Кроме нанесенного колоссального ущерба в сферах жизнеобеспечения, произошло тяжелейшее психологическое воздействие на огромные массы населения.

В XX в. наиболее разрушительное по мировым меркам Таншаньское (1976) землетрясение в Китае

\* См., например: Никонов А.А. Землетрясения в Северном Афганистане: развитие одной гипотезы (1998. №6. С.19–23); Никонов А.А. Подземные опасности в Москве (2003. №6. С.63–69); Родкин М.В. Задача: прогноз землетрясений (2010. №10. С.31–37); Никонов А.А. Сейсмическая угроза мегаполису Стамбулу: возможны варианты (2018. №10. С.46–57).

\*\* Никонов А.А. Ашхабадская катастрофа: известная и неизвестная (1998. №10. С.11–20); Никонов А.А. Ашхабадская катастрофа 1948 года. Помнить уроки (2018. №11. С.52–59).

и широко известное землетрясение Тохоку, вызвавшее геозкологическую катастрофу из-за последовавшей за ним аварии на АЭС «Фукусима» в Японии, относятся к этому же классу не ожидавшихся событий. Землетрясения в Японии происходят часто, но до этого события большинство специалистов полагали, что сильнейшее возможное здесь землетрясение может иметь магнитуду 8.8\*. Тохоку же оказалось существенно мощнее, и волна цунами легко перемахнула через слишком низкую для нее защитную стену АЭС.

Возможное решение означенной проблемы — привлечение данных по историческим и палеоземлетрясениям. Именно разработке методов, поиску и использованию таких данных и посвящена большая часть публикаций Андрея Алексеича. Он активно привлекает и анализирует как исторические свидетельства (газетные заметки, рапорты местных администраций, частную и научную переписку, забытые архивные материалы и многое другое), так и данные полевых макросейсмических и сейсмогеологических исследований, как коллег, так и своих собственных. Андрей Алексеич успешно разрабатывал и применял археосейсмический метод в районах древних цивилизаций в южных регионах СССР и России. Он скрупулезно изучал легенды, сказания и древние мифы, ко-

\* Левин Б.В., Родкин М.В., Тихонов И.Н. Великое Японское землетрясение. Природа. 2011. №10. С.14–22.



На Конференции по современным движениям земной коры в г.Секешфехерваре (Венгрия). 1993 г.

торые часто базируются на реальных катастрофах прошлого\*\*. Ведущая роль Андрея Алексеича Никонова в этих пионерных исследованиях несомненна. Отметим, что при этом ему во многом

\*\* См., например, следующие публикации А.А.Никонова в «Природе»: Сейсмические мотивы в «Калевале» и реальные землетрясения в Карелии (2004. №8. С.25–31); Земные проделки скандинавских божеств (2006. №4. С.19–26); Между Сциллой и Харибдой. К 100-летию Мессинской катастрофы (2008. №12. С.36–50); Песня о Гайавате в оркестровке сейсмолога (2013. №11. С.53–60); Аргонавты: испытание на пути в Понт (2015. №2. С.38–45); Мощное цунами в проливе... Керченском (2016. №5. С.29–38; №7. С.30–40).



На развалинах кишлака, погибшего при Ашхабадском землетрясении 1948 г. Слева направо: Т.П.Белоусов, А.А.Никонов, В.Шенк. 1988 г.

Фото Г.Л.Галинского



Перед визуальными наблюдениями геоморфологических особенностей берегов Финского залива. Эстония. 2001 г.

пришлось идти против течения, так как подобные исследования казались старомодными. Реализовать их оказалось бы еще труднее, если бы начинающий молодой тогда ученый не поддержал известный советский сейсмолог Н.В.Шебалин.

Действительно, успехи науки прочно ассоциируются с современными системами регистрации и с изощренными методами обработки информации. По сравнению с этим работа Андрея Алексеевича со старыми газетами и анализом фольклора и мифов, да и полевые исследования с использованием фотоаппарата и самого простейшего оборудования (лопаты, ручного бура, компаса, блокнота, карандаша да рулетки) кажется оставшейся от прошлого века. Тем не менее он оказался прав. Начиная с 1980-х годов методы архео- и палеосейсмологии получают широкое распространение в мире. Все больше специалистов сейчас успешно занимаются этими вопросами и в нашей стране.

Среди важных практических результатов этой деятельности Андрея Алексеевича можно отметить отказ от эксплуатации почти готовой АЭС в Крыму. Окончательное решение было принято в 1989 г. на государственном уровне после Чернобыльской катастрофы, на волне общественных вы-

ступлений. Но исходные данные для этого были получены по результатам работы группы специалистов, где значительную роль играли аргументы, высказанные Никоновым и следующие из его разработок по исторической сейсмичности Крыма.

Аналогичный сюжет возник и много позже. Палеосейсмологические и геоморфологические данные, а также результаты интерпретации эпоса народов Фенноскандии в совокупности убедительно свидетельствуют о происходивших там в прошлом сильных землетрясениях. Об этом говорят многочисленные публикации на данную тему в «Природе» и самого Андрея Алексеевича, и других авторов\*.

Предполагаемая сила древних землетрясений резко противоречит более чем умеренному современному уровню сейсмической активности Фенноскандии, как он оценивается по инструментальным наблюдениям за последние 60–100 лет. А ведь именно на этих данных зиждутся все инженерные решения по сейсмобезопасности Кольской

АЭС (КоАЭС), городов Кольского п-ова, портов и баз на побережье Баренцева моря.

Ситуация усугубляется тем, что несколько из выявленных в Имандровской впадине площадей развития крупных сейсмонарушений возрастом 2–10 тыс. лет расположены в пределах 18–30 км от КоАЭС, а другие — в окрестностях Мурманска. Отметим, что оба этих участка (да и другие) в последние годы не остаются без внимания специалистов. Так, в 2018 г. я участвовал в полевых исследованиях в обоих районах совместно со специалистами из Института физики Земли РАН, Института географии РАН и Геологического института Кольского научного центра РАН (ГИ КНЦ РАН). На меня сильное впечатление произвели не только выразительные сейсмонарушения, фиксируемые вблизи КоАЭС, но и высокая плотность расположенных здесь пунктов наблюдения GPS—GLONAS. На основном участке развития дислокаций стоит новенький домик для проживания специалистов, а пункты наблюдений GPS—GLONASS, общим числом почти до сотни, располагаются по бортам и на днище

\* См., например: Николаева С.Б. Тропою лешего (2012. №7. С.26–32); Никонов А.А. Балтика: тысячелетний катаклизм (2017. №8. С.58–68).

сейсмогенного разрыва (ущелья) с невиданной плотностью — часто на расстояниях 10–20 м друг от друга. Этот метод измерений, надо сказать, применен здесь лишь спустя почти 20 лет после сейсмогеологического обследования и первых публикаций С.Б.Николаевой (ГИ КНЦ РАН).

Повторю, что возможность иного (несейсмического) механизма образования упомянутых выше участков с четкими палеодеформациями представляется маловероятной. Но также не следует забывать и о кричащем рассогласовании оценок мощности палеоземлетрясений и современного уровня сейсмичности по инструментальным данным. Добавлю, что проведенный (с участием автора данной заметки) по результатам столетних инструментальных наблюдений расчет максимально возможных землетрясений Фенноскандии на основе статистически корректного метода предельных распределений теории экстремальных значений дал достаточно скромные значения магнитуды  $M_{\max} = 5.9 \pm 0.3$ . Этого явно недостаточно для образования палеодислокаций, выявленных как в российской, так и в зарубежной части Фенноскандии (на северо-западе региона палеодислокации выражены в среднем заметно сильнее).

Очевидным образом возникает дилемма: порождается ли такое рассогласование крайней редкостью сильных сейсмических событий или сейсмический режим и интенсивность землетрясений в Фенноскандии не только в период завершения оледенения, но и в последующие тысячелетия кардинально отличались от существующих в наше время? Если верно первое, то сейсмическая угроза стратегически важных и потенциально высокоопасных объектов на Кольском п-ове основатель-



На обследовании молодой сейсмодетформации (пещеры) на западном борту Имандровской впадины (Кольский п-ов). 2011 г.

но недооценена в масштабе столетий и тысячелетий. Во втором случае мы имеем, пожалуй, первый пример быстрого и сильного изменения сейсмического режима во времени. Своевременный ответ на этот вопрос чрезвычайно важен.

Значительность работ Андрея Алексеевича далеко не исчерпывается рассмотренными сюжетами. Констатируем в заключение, что все эти 50 лет он был вместе не только с журналом «Природа», но и с самой Природой, и с жизненно важными и актуальными проблемами нашей страны\*. Пожелаем ему здоровья и успешного продолжения плодотворной деятельности.

Я благодарен судьбе, связавшей меня со многими яркими талантливыми самобытными геофизиками и геологами, среди которых Андрей Алексеевич занимает почетное место. ■

\* См. например: Никонов А.А. Катавасия каталогов катастроф. Природа. 2013. №4. С.3–10.

**В публикации использованы материалы, полученные в ходе выполнения проекта 17-05-00351, поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований.**

## More than Half a Century with “Priroda”

M.V.Rodkin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS (Moscow, Russia)

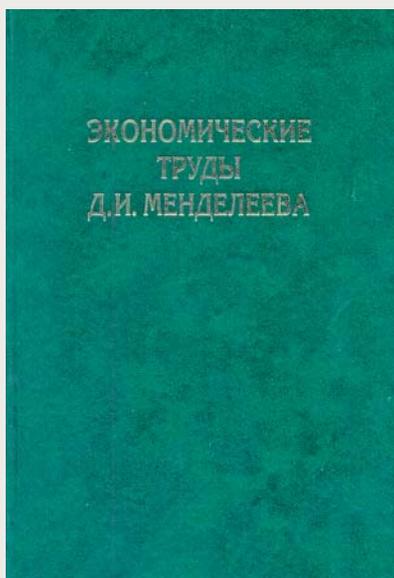
<sup>2</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS (Uzhno-Sakhalinsk, Russia)

<sup>3</sup>Institute of Oil and Gas Problems, RAS (Moscow, Russia)

We present a review of articles, written by the famous Russian seismologist A.A.Nikonov, who has been working with “Priroda” for more than 50 years.

## История науки

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТРУДЫ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА: В 6 т. М.: Наука, 2018.



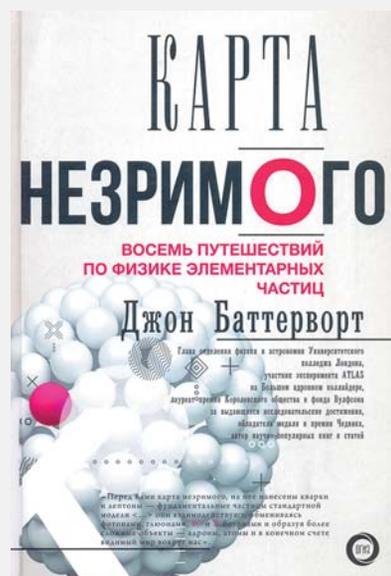
Д.И.Менделеев — не только выдающийся химик, создатель Периодической системы химических элементов, педагог и изобретатель, но и человек системного мышления, философ и экономический гений своего времени. Благодаря разработанной им протекционистской тарифной системе и указам императора Александра III Россия в 1913 г. занимала четвертое место в мире по внутреннему валовому продукту на душу населения и первое место по темпам роста экономики.

Первый том содержит статью «О современном развитии некоторых химических производств в применении к России и по поводу Всемирной выставки 1867 года» и докладную записку «Материалы для пересмотра общего таможенного тарифа Российской империи по европейской торговле». Второй и третий тома заняло сочинение «Толковый тариф или исследование о развитии промышленности в России в связи с ее общим таможенным тарифом 1891 г.». В четвертом томе опубликованы работы «Об условиях развития заводского дела в России», «О возбуждении промышленного развития в России», «Письма о заводах» и «Учение о промышленности». В пятом томе, помимо трудов «Фабрично-заводская промышленность России» и «К познанию России», собраны заметки, письма и статьи о коммерческой политике, о заводах и фабрично-заводской промышленности, о химической промышленности, о всероссийских выставках, об исследованиях Северного полярного океана и др. В шестом томе напечатан труд «Заветные мысли».

## Физика элементарных частиц

**Дж.Баттерворт. КАРТА НЕЗРИМОГО. ВОСЕМЬ ПУТЕШЕСТВИЙ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ** / Пер. с англ. О.С.Сажинной. М.: АСТ, 2018. 304 с. (Сер.: Лекторий. Как устроен мир).

Автор сумел на редкость интересно, понятно и при этом вполне научно рассказать о стандартной модели элементарных частиц и квантовой электродинамике. Главный прием, позволивший совершить подобное чудо, — построение карты микромира, в которой выдержано приблизительное направление от меньших энергий к большим (и уменьшение характерных масштабов) с запада на восток, а также рост «многокомпонентности» с юга на север. При этом энергетическая шкала иногда показывает изменение энергии, а иногда — массы. Путешествие начинается с острова Лептонов (электрон, мюон и тау-лептон, а также нейтринный сектор на недоступном юго-западе), далее идет Земля Атома (с уникальным порядком элементов, каждый из которых содержит ядро, окруженное электронами), остров Андронов (протон, нейтрон и др.), остров Кварков (верхний и нижний, очарованный и странный, истинный и прелестный кварки) и Бозония (w- и z-бозоны, а также бозон Хиггса, встречающийся за хребтом Нарушения Электрослабой Симметрии). С восточного берега Бозонии (за меридианом порядка  $10^{12}$  эВ) открываются неведомые дали, в которых мерещатся темная материя и энергия, суперсимметрия, дополнительные измерения, квантовая гравитация, сфалероны и частицы-хамелеоны.



## Биоакустика

**А.В.Агафонов, И.В.Логоминова, Е.М.Панова.** ДВЕ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКИХ КОММУНИКАТИВНЫХ СИГНАЛОВ АФАЛИН (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821): ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТРУКТУРА, ФУНКЦИИ. Симферополь: ИТ«Ариал», 2018. 164 с.

Афалины, как и все зубатые киты, используют звуковые сигналы для эхолокации, излучая в пространство серии широкополосных щелчков. Кроме того, эти дельфины продуцируют и другие звуки — тональные (свисты) и импульсно-тональные сигналы. Авторы рассматривают их как две системы акустической коммуникации данного вида. В репертуаре свистов каждого дельфина можно выделить группу доминирующих, названных персонифицированными. Их ядро — «свист-автограф» — некая совокупность однотипных сигналов со специфической формой частотного контура, характерной только для данной особи. Значительная часть книги уделена импульсно-тональным сигналам, представляющим собой последовательности импульсов с частотой от 150 до 700 Гц, меняющейся за счет изменения длительности интервалов между ними. Эти сигналы образуют структурированную систему, принципы организации которой коренным образом отличаются от системы свистов. Сложную внутреннюю иерархичность, типологию (на основе анализа частотно-временных характеристик) и возможные функции подобных сигналов афалин удалось выявить в ходе исследований их подводной акустической сигнализации. Книга продолжает монографию «Типология тональных сигналов афалин», выпущенную этими же авторами в 2016 г.



## Зоология

**Л.В.Каабак.** ТРЕВОЖНОЕ ОЖИДАНИЕ ЧУДА: В ГОРАХ, В ТАЙГЕ И В ДЖУНГЛЯХ. М.: Техника — молодёжи, 2018. 388 с.



Автор — профессор-химик, доктор химических наук — рассказывает об удивительных приключениях, произошедших с ним во время 30 экспедиций за бабочками на Сахалин, в уссурийские леса, в горы Средней и Центральной Азии, в джунгли Южной Америки и Африки. Интерес к бабочкам возник у него еще в детстве, но жизнь в послевоенные годы в Эстонии, где в лесах лежали неразорвавшиеся бомбы и снаряды, привела к увлечению химией, ставшей профессией автора. Однако память о встрече с бражником мертвая голова в Молдавии в 1963 г. и долгое желание заполучить хоть один экземпляр (лишь в 1975 г. выяснилось, что это невозможно) привели его к поездке летом 1976 г. в первую энтомологическую экспедицию. Познавательное значение книги заключено не только в рассказах о наблюдениях за бабочками и описании интересных и редких видов. Любопытны истории об экспедициях: о быте, о решении возникающих в полевых условиях проблем, о преодолении природных катаклизмов и о лечении болезней, о борьбе с бюрократическим рогатками, — т.е. то, что будет полезно всем, кто хочет поехать в дикие, экзотические места. Читатель найдет мастерски описанные картины природы, встречи с животными всевозможных краев и частей света. А сколько людей из разных стран прошло перед автором, со сколькими коллегами он успел пообщаться и поработать! И обо всех он рассказал живо и увлекательно.

ЕВРЕИ / Отв. ред. Т.Г.Емельяненко, Е.Э.Носенко-Штейн. М.: Наука, 2018. 783 с. (Сер.: Народы и культуры).



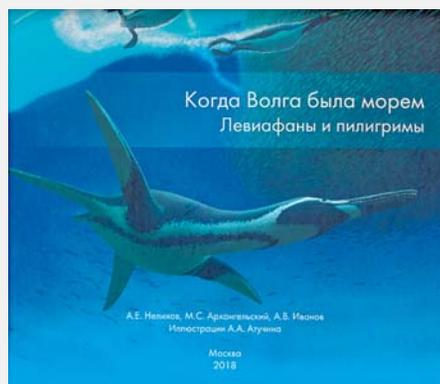
История евреев уходит корнями в глубокую древность. В Сиро-Палестинском регионе сформировался язык иврит, возник древнееврейский алфавит, сложился монотеизм и появились древние формы государственности — Израильское и Иудейское царства. Позже их территория полностью или частично входила в состав Вавилонского царства, Персидской державы, Селевкидской Сирии, Римской империи. В древности же возникли и первые еврейские общины, расположенные на территории других государств. Дисперсный тип проживания стал преобладающим с начала 1-го тысячелетия н.э., когда после подавления двух антиримских восстаний в провинции Иудея (67–73 и 132–135 гг.) произошла утрата государственности и этнической территории. Еврейскую диаспору обычно рассматривают как классическую (наряду с армянской, греческой, иногда цыганской). На протяжении веков, существуя в рассеянии, нередко во враждебном окружении, евреи сохраняли свою культурную самобытность и идентичность, чему в основном способствовала религия — иудаизм. В эпоху Средневековья и в начале Нового времени понятия «еврей» и «иудей» были практически тождественными. Евреев можно было рассматривать как конфессиональную (или этноконфессиональную) общность, хотя в разных странах евреи говорили на разных языках, испытывали влияние различных культур, имели существенные различия в хозяйственном укладе, жилище, одежде, поведенческой культуре и т.п. В эпоху Средневековья в Европе возник антииудаизм, т.е. неприятие религии и ее последователей (как несущих коллективную ответственность за некогда совершенное богоубийство). С конца XVIII в. ситуация начала понемногу меняться (сначала в Европе) в процессе так называемой эмансипации (обретения гражданских прав) и сопровождающих ее аккультурации и секуляризации (и/или перехода в христианство), когда евреи стали все более отходить от иудаизма и основанной на нем традиции. Но тогда же в Европе возник политический, а затем и расовый антисемитизм, произошла дальнейшая мифологизация уже не иудеев, а евреев — независимо от их религиозной принадлежности или отсутствия таковой.

В монографии рассмотрены общие вопросы происхождения и истории еврейского народа, особенности антропологического облика и языков, а также проблемы изучения еврейского фольклора и этнографии. Основное внимание уделено этнополитической истории и своеобразию традиционной культуры российских евреев: их занятиям, костюму, обрядам жизненного цикла, религиозным праздникам, пище, народным знаниям, фольклору, декоративно-прикладному искусству, образованию. Специальные разделы освещают многообразные этнокультурные процессы, протекающие в современном мире в среде евреев, взаимоотношения евреев с другими народами. В отдельных разделах даны историко-этнографические материалы по неашкеназским (ашкеназы — субэтническая группа евреев, сформировавшаяся в Центральной Европе) группам: грузинским и бухарским евреям и иудействующим. В создании тома приняли участие историки, филологи, этнографы, антропологи, социологи и фольклористы из России, Украины, Израиля и Франции.

## Палеонтология

**А.Е.Нелихов, М.С.Архангельский, А.В.Иванов.** КОГДА ВОЛГА БЫЛА МОРЕМ. ЛЕВИАФАНЫ И ПИЛИГРИМЫ. М.: Университетская книга, 2018. 140 с.

В мезозойскую эру на месте Поволжья длительное время располагалось обширное внутреннее Русское море, соединявшееся на юге с океаном Тетис, связь же с северным Бореальным океаном временами прерывалась. В этом море плавали разнообразные хищные рептилии: ихтиозавры и плезиозавры, крокодилы и мозазавры, морские черепахи. Многие из них были настоящими левиафанами юрского и мелового периодов. Как настоящие пилигримы, они избородили вдоль и поперек все моря и океаны планеты, проплывая от территорий современных США до Поволжья и наоборот. Многочисленные остатки образовали в Поволжье настоящую палеонтологическую кладовую ископаемых костей, крайне важную для понимания эволюции мезозойских морских пресмыкающихся. Об интересных и значимых находках вымерших рептилий, о мире и сообществах, в которых они обитали, а также об исследователях, изучавших почти 200 лет ископаемую летопись региона, рассказывает эта книга. Ее первое издание, вышедшее в 2012 г., было меньше по объему почти в пять раз, так как прогресс в изучении морских ящеров Поволжья пришелся как раз на последующие годы. Становится ясно, что разнообразие древних животных, обитавших в мезозое в Русском море, было не меньшим, чем в Западном внутреннем море Северной Америки.



## Музееведение

**ПУТЕВОДИТЕЛЬ ПО ЗАЛАМ ГОСУДАРСТВЕННОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МУЗЕЯ им.В.И.ВЕРНАДСКОГО РАН / Авт.-сост. И.А.Стародубцева, И.П.Андреева, З.А.Бессуднова, Н.Н.Самсонова, Е.Ю.Закревская, Н.А.Вишневецкая, Е.Л.Минина; отв. ред. С.В.Черкасов.** М.: ГГМ РАН, 2018. 176 с.



Рассказ о музее в путеводителе начинается со знакомства с миром минералов и богатством недр России, далее идет информация о геосферах, о геологической истории Земли, о метеоритах, о геодинамических процессах, об истории развития органического мира, о геологии окрестностей Москвы. Интересен раздел об исторических коллекциях: коллекциях Московского Императорского университета и частных коллекциях в собрании музея (в том числе о коллекции С.М.Миронова). Экспозиция одного из залов названа «Геологическая кунсткамера», она демонстрирует разнообразие форм природных тел, здесь можно увидеть примеры поразительного сходства живого и косного. Завершающий раздел путеводителя, «Наша история», рассказывает о первом естественнонаучном музее Москвы — Минеральном кабинете Императорского Московского университета (его основу составили коллекции Прокопия, Григория и Никиты Демидовых, доставленные в университет в 1759 г.) — и о непростой последующей истории его преобразований. А также о борьбе научной и музейной общественности за сохранение единства коллекций, завершившейся воссоединением в 1987 г. Геолого-палеонтологического музея имени А.П. и М.В. Павловых и Минералогического музея имени В.И.Вернадского.

# Информация для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию материалы можно

прислать по электронной почте. Текст статьи, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате doc, txt или rtf. Иллюстрации предоставляются отдельными файлами. Принимаются векторные и растровые изображения в форматах EPS или TIFF (без LZW-компрессии). Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (Bitmap) — не менее 800 dpi. Векторные изображения должны быть выполнены в программе CorelDRAW или Adobe Illustrator.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала. См.: <https://naukabooks.ru/zhurnali/katalog/priroda/>

## **ПРИРОДА** 2/2019

Сочредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»  
Главный редактор: А.Ф.Андреев  
Заместитель главного редактора: А.В.Бялко

Ответственный секретарь  
Е.А.Кудряшова

Научные редакторы  
М.Б.Бурзин  
Т.С.Клювиткина  
Е.В.Сидорова  
Н.В.Ульянова  
О.И.Шутова

Литературный редактор  
Е.Е.Жукова

Заведующая редакцией  
И.Ф.Александрова

Перевод содержания  
Т.А.Кузнецова

Графика, верстка:  
С.В.Усков

Подписной индекс: 70707  
Дата выхода в свет: 7.03.2019  
Формат 60×88 1/8. Цифровая печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Бум. л. 12  
Тираж 1000 экз.  
Цена свободная  
Заказ 854  
Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 117997, Москва, ул.Профсоюзная, 90  
По вопросам публикации материалов:  
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4171),  
e-mail: priroda@naukaran.com  
По вопросам сотрудничества:  
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4301 или 4291),  
e-mail: journals@naukaran.com  
Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., 6.

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом Совета министров СССР по печати 13 декабря 1990 г.

Свидетельства о регистрации №1202 и ПИ №1202.

Все права защищены. Перелечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

12+

# НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



## Уважаемые коллеги!

Открыта подписка для физических лиц  
на номера 2019 г. научно-популярных журналов  
«Земля и Вселенная», «Природа»,  
«Энергия: экономика, техника, экология»

### **Журнал «Земля и Вселенная»**

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1200 руб.  
Стоимость полугодового комплекта (3 номера) 750 руб.  
Стоимость 1 номера 400 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495)276-77-35 (доб. 42-31)  
E-mail: zevs@naukaran.com  
ул. Профсоюзная, 90, к. 423

### **Журнал «Природа»**

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.  
Стоимость полугодового комплекта (6 номеров) 1800 руб.  
Стоимость 1 номера 500 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495)276-77-35 (доб. 41-71)  
E-mail: priroda@naukaran.com  
ул. Профсоюзная, 90, к. 416

### **Журнал «Энергия: экономика, техника, экология»**

Стоимость полугодового комплекта (6 номеров) 1500 руб.  
Стоимость 1 номера 500 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495) 362-57-66  
E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru  
ул. Красноказарменная, 17а

# Уважаемые авторы!

## Приглашаем вас принять участие в Конкурсе молодых авторов

Конкурс учрежден Издательством «Наука» для привлечения молодых авторов  
Заявки и работы для участия в Конкурсе принимаются с 9 января по 31 июля 2019 года

К участию в конкурсе принимаются оригинальные,  
не публиковавшиеся ранее, не участвующие в других  
конкурсах статьи по трем блокам:

- астрономия, космонавтика, экология, геофизика, геодезия
- энергетика, биоэнергетика
- физика, химия, биология

По итогам Конкурса награждаются три победителя:



Сертификат на издание научной  
или научно-популярной книги



Сертификат на подготовку  
оригинал-макета научной  
или научно-популярной книги



Сертификат на редактирование научной  
или научно-популярной книги

Подать заявку и узнать подробности  
о Конкурсе вы можете на сайте

[ys.naukapublishers.ru](http://ys.naukapublishers.ru)