



За кулисами нобелевских открытий:

Л.В. Радушкевич –
один из первооткрывателей
углеродных нанотрубок



Эта публикация появилась благодаря одному из наших авторов – д.х.н. А.К. Петрову из Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, который однажды рассказал в редакции интересную историю об открытии одной из «наномодификаций» углерода. Когда в начале 1990-х гг. начался бум углеродных нанотрубок, вызванный публикацией сенсационных фотографий японца С. Иидзими, Александр Константинович вспомнил, что о чем-то подобном он уже слышал. В своей старой картотеке он действительно обнаружил реферат статьи советских ученых Л.В. Радушкевича и В.М. Лукьяновича, опубликованной в «Журнале физической химии» еще в 1952 г. – почти за четыре десятилетия до знаменитой статьи Иидзими! Увидев поразительные фотографии углеродных «червячков», которые наши химики сделали с использованием просвечивающего электронного микроскопа еще в середине прошлого века, мы решили начать поиски информации о судьбе и деятельности тех, кому, по сути, принадлежит приоритет в открытии нанотрубок. Нам удалось связаться с внучкой Радушкевича Т.Ю. Головенко. В ее архиве обнаружили уникальные фотографии и творческая автобиография этого незаурядного человека и серьезного ученого, кстати сказать, из-за своего дворянского происхождения чуть было не ставшего жертвой репрессий 1930-х гг.

Сегодня приставка «нано» затерлась от неумеренного и зачастую неоправданного употребления, но суть ее осталась прежней: в появлении у вещества при переходе размерного рубежа в 100 нм новых физических свойств по сравнению с объемными материалами. Прекрасный пример эффектов сниженной размерности демонстрирует семейство углеродных наноматериалов: от фуллеренов с наноразмерами по всем трем измерениям до молекул графена, представляющих собой единичный графитовый слой. Между этими объектами лежат углеродные нанотрубки, имеющие наноразмеры только в двух измерениях (Кац, 2008).

Нанотрубки обладают рядом исключительных механических, электрофизических и физических свойств, что предопределяет их использование в самых передовых, инновационных технологиях. Так, в зависимости от своих структурно-геометрических характеристик нанотрубки могут проявлять свойства как металлов, так и полупроводников. Кроме того, они обладают прочностью, намного превышающей прочность самых лучших сталей, и при этом – намного меньшей плотностью, а также очень высоким уровнем сопротивления деформации и высокой теплопроводностью. Машиностроение, компьютерные технологии, оптика, электроника... Сферы применения углеродных нанотрубок все расширяются по мере более углубленного изучения их свойств и налаживания масштабного производства этого перспективного материала будущего.

Считается, что первые углеродные нанотрубки были получены еще в конце XIX в. В 1889 г. американцы Т. Хьюз и С. Чамберс запатентовали способ получения

«нитевидного углерода» путем пиролиза смеси метана и водорода и предложили использовать его в лампах накаливания. Однако созданные Т. Эдисоном лампочки на основе таких нитей имели слишком маленький срок службы (Варламова, 2013). А еще ранее удивительные свойства этого материала, очевидно, использовались при изготовлении знаменитой дамасской стали. Похоже, что именно многослойным углеродным нанотрубкам, заполненным цементитом (карбидом железа), эта сталь обязана своим необычным сочетанием твердости и гибкости (Reibold *et al.*, 2006).

И все же «официальное» открытие углеродных нанотрубок – наиболее известных представителей семейства фуллеренов, «третьей» формы чистого углерода после алмаза и графита – состоялось лишь в прошлом веке.

В тени научного олимпа

В 1991 г. японский физик С. Иидзима с помощью просвечивающей электронной микроскопии обнаружил и описал геометрию удивительных углеродных образований, полученных им при воздействии на расплывленный графит электродуговым разрядом. Эти «нанотрубки», как он их назвал, представляли собой многостенные полые цилиндры диаметром не более нескольких нанометров, «свернутые» из атомных углеродных слоев. Описание их структуры и микрофотографии произвели сенсацию в научном сообществе

Редакция благодарит д.х.н. А.К. Петрова (ИХКГ СО РАН, Новосибирск) за идею публикации и Т.Ю. Головенко (Москва) за предоставленные фотографии и дневниковые материалы ее деда Л.В. Радушкевича.

Статья появилась благодаря большой работе, проделанной к.ф.-м.н. З.К. Силагадзе (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) по поиску опубликованных и архивных материалов и подготовке обзора истории исследований углеродных нанотрубок

Ключевые слова: история науки, углеродные нанотрубки, бакминстерфуллерен, теория равновесной адсорбции, аэрозоли.

Key words: history of science, carbon nanotubes, buckminsterfullerene, equilibrium adsorption theory, aerosols

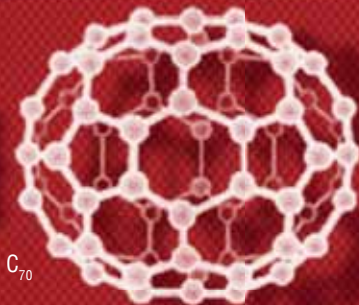
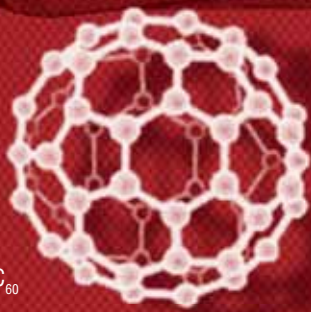


Павильон США на Всемирной выставке в Монреале «EXPO-67», спроектированный архитектором Р. Бакминстером Фуллером

и привели к настоящему рывку в исследованиях, посвященных синтезу и практическому применению нового материала.

Работы Иидзиму увидели свет спустя шесть лет после шумевшего открытия самого первого известного представителя семейства углеродных наноматериалов – бакминстерфуллерепа, молекулы C_{60} , имеющей форму футбольного мяча. Эта молекула была впервые получена в лаборатории в результате лазерного облучения графита при проверке гипотезы,

Фуллерены представляют собой полиэдрические кластеры чистого углерода, молекулярный каркас которых состоит из пяти- и шестиугольников из углеродных атомов. К этому семейству относятся и нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры с нанометровым диаметром и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей



В молекулах фуллеренов атомы углерода расположены в вершинах правильных шести- и пятиугольников, из которых составлена поверхность сферы или эллипсоида. Самый симметричный и наиболее полно изученный представитель семейства фуллеренов – бакминстерфуллерен (C_{60}), в котором углеродные атомы образуют усеченный икосаэдр, напоминающий футбольный мяч

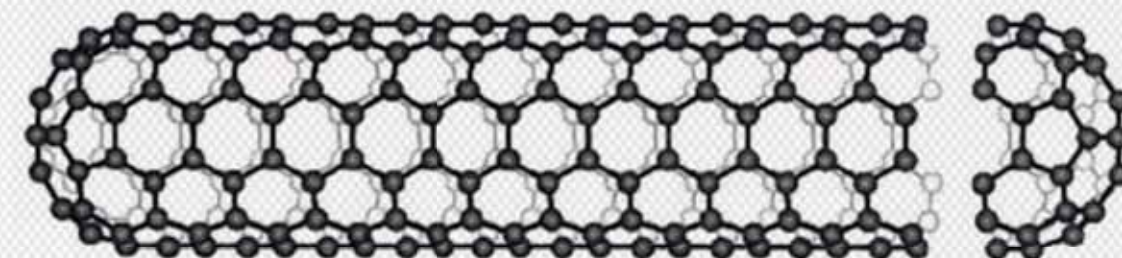
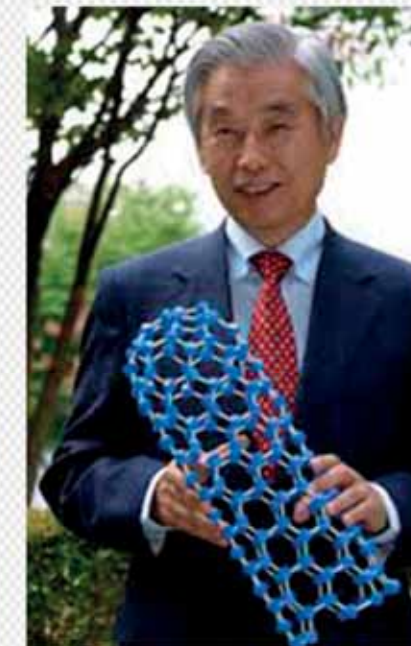
Будущий нобелевский лауреат Х. Крото (крайний справа) вместе с сотрудниками лаборатории канадского Национального исследовательского совета после открытия в космосе органических соединений, послужившего толчком к открытию фуллеренов. Фото с <http://www.kroto.info/>



что источниками обнаруженных в космосе сложных углеродных цепочек являются углеродные звезды. Эксперимент по моделированию «звездных» условий дал неожиданный результат: масс-спектрометр показал значительное присутствие в парах графита кластеров C_{60} . Раздумывая над проблемой стабильности таких огромных молекул, один из авторов открытия, британский химик Х. Крото вспомнил об удивительной биосфере Фуллера, послужившей прототипом павильона американской экспозиции на Всемирной выставке «EXPO-67» в Монреале. Так появилось предположение о форме и структуре этого соединения, которое впоследствии было названо в честь архитектора Р. Бакминстера Фуллера.

Японского физика С. Иидзиму часто называют изобретателем углеродных нанотрубок. Однако несмотря на ожидания Нобелевскую премию за это открытие он не получил, хотя его статья, опубликованная в *Nature* в 1991 г., вошла в сотню самых цитируемых научных публикаций в мире

Если молекулу C_{60} разрезать пополам и добавить экваториальный пояс из десяти атомов углерода, получится молекула C_{70} , похожая на мячик для игры в регби. Если же добавить много экваториальных поясов, то в результате образуется длинная молекула – нанотрубка (Кац, 2008)



В 1996 г. за открытие принципиально новой формы углерода Крото совместно с американскими учеными Р. Керлом и Р. Смолли был награжден Нобелевской премией по химии, а сам Иидзима чуть было не стал нобелевским лауреатом в 2006–2007 гг. Но в «тени» этих звездных работ, попавших на самую вершину научного олимпа, остались значимые работы немало числа других ученых, которые либо не получили дальнейшего развития, либо просто остались незамеченными мировым научным сообществом. Результаты этих исследований, многие из которых просто опередили свое время, сегодня стали уделом истории науки.

Среди этой «подводной части наноайсберга» мы найдем немало имен наших соотечественников. Так, еще в августе 1985 г., за месяц до публикации по бакминстерфуллерену, вышла статья киевского химика М. Ю. Корнилова «Нужен трубчатый углерод», где он предсказал возможность существования новой формы углерода – одностенных нанотрубок. Эти идеи появились у него еще в конце 1970-х гг., но из-за сложности квантово-химических расчетов теоретически рассчитать такие трехмерные структуры ему не удалось.

Однако подобную работу смогла проделать команда московских ученых из Института элементоорганических соединений АН СССР, искавшая полые углеродные замкнутые структуры, куда могли быть помещены атомы металлов. Когда оказалось, что молекула C_{20} , имеющая форму додекаэдра, нестабильна, И. В. Станкевич, один из участников проекта и заядлый футболист, предложил замкнутую структуру C_{60} с симметрией усеченного икосаэдра, по сути – в виде футбольного мяча. Квантово-химический расчет этой структуры, проведенный в 1971 г., показал, что C_{60} действительно является стабильной молекулой. Тем не менее убедить химиков синтезировать эту структуру не удалось, поэтому вплоть до 1985 г. она считалась теоретической выдумкой. И нужно отдать должное нобелевскому лауреату Смолли, в своей лекции отметившему вклад советских ученых в открытие фуллеренов.

Спускаясь еще ниже по хронологической шкале, мы подходим к середине XX в., а именно к 1952 г., когда советские ученые Л. В. Радужкевич и В. М. Лукьянович опубликовали в «Журнале физической химии» статью «О структуре углерода, образующегося

при термическом разложении окиси углерода на железном контакте». В ней было приведено 12 фотографий, сделанных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, на которых видны скопления нитевидных частиц. Их длина достигала 5–7 мкм, а диаметр наиболее тонких составлял около 30 нм. Говоря словами авторов, этот «углерод имеет весьма своеобразную структуру, до настоящего времени никем не описанную..., большинство частиц имеют характерную червеобразную форму с характерными окончаниями...,

внутри частиц проходит канал..., сами частицы являются пустотелыми... с постоянными диаметрами по всей длине...».

Статья поступила в редакцию 5 января 1951 г. Спустя два года в *Nature* было опубликовано краткое сообщение из Великобритании, в котором также описывались «углеродные червячки» «спиральной формы», при этом авторы даже не смогли определить их внутреннее строение. Однако в многочисленных статьях, вышедших сразу после открытия Иидзимы, не было упоминания



М. М. Дубинин и Л. В. Радушкевич (справа) около электронного микроскопа в Институте физической химии РАН СССР (Москва).

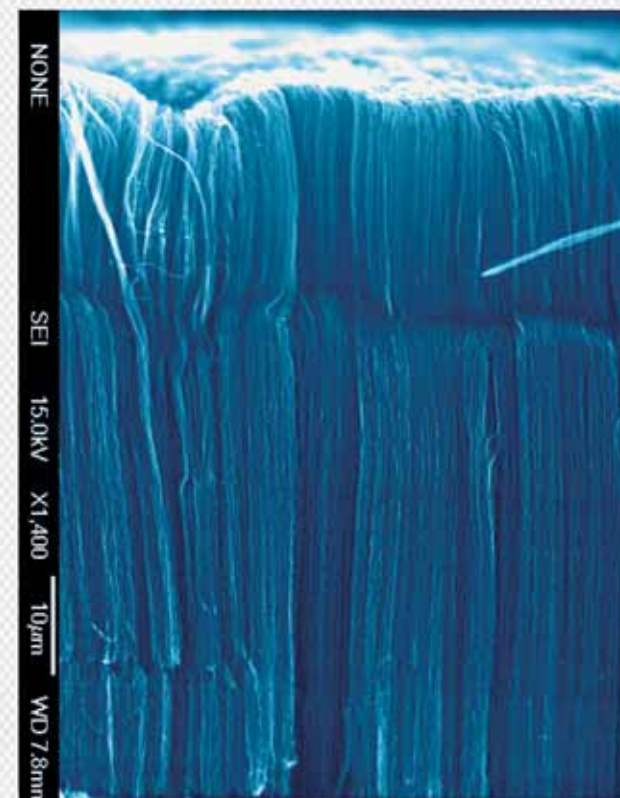
Не исключено, что на этой фотографии есть и соавтор Радушкевича – В. М. Лукьянович

Первые в мире электронно-микроскопические изображения многостенных углеродных нанотрубок, как их принято называть в соответствии с современной терминологией.

По: (Радушкевич, Лукьянович, 1952)



о работах ни британских, ни советских ученых. Собственно говоря, слава так и не нашла своих героев. Однако в 2006 г. в журнале *CARBON* была опубликована статья его редактора М. Монтье и В. Л. Кузнецова из новосибирского Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, из которой следовало, что приоритет в открытии многослойных нанотрубок принадлежит Радушкевичу и Лукьяновичу. Сейчас же упоминание об их работе можно найти в академических словарях и в обзорах специалистов по фуллеренам.



Массив углеродных нанотрубок на кремниевой подложке, синтезированный в Институте неорганической химии СО РАН (Новосибирск) (Окотруб, 2009). Электронная микроскопия. Фото В. Даниловича

«Нано» из СССР

Кем же они были – первооткрыватели углеродных нанотрубок? К сожалению, информации о д.х.н. В. М. Лукьяновиче удалось отыскать крайне мало, не говоря уже о его фотографиях. Известно только, что в 1967 г. он вместе с коллегами из Института физической химии при исследовании импульсного метода роста алмаза впервые получил нитевидные кристаллы – так называемые «алмазные усы». Рост подобных

Л. В. РАДУШКЕВИЧ

Крупный российский физико-химик, доктор химических наук, профессор. Родился 7 декабря 1900 г. в Москве. В 1928 г. окончил отделение физики физико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. В течение многих лет преподавал в Военной академии химической защиты.

В Институте физической химии РАН работал с апреля 1948 г. до своей кончины 9 ноября 1972 г. Л. В. Радушкевич – соавтор общеизвестного и широко применяемого во всем мире уравнения адсорбции Дубинина-Радушкевича, опубликованного в 1947 г. в Докладах АН СССР и с тех пор являющегося основополагающим для развития теории объемного заполнения микропор. В 1997 г. в США в рамках Международной конференции по углероду (Carbon'97) было проведено специальное заседание, посвященное 50-летию уравнения Дубинина-Радушкевича.

Основные научные интересы Л. В. Радушкевича лежали в области изучения капиллярной конденсации в дисперсных системах, теории кинетики и динамики адсорбции, выявления механизмов процессов фильтрации аэрозолей и разработки методов исследования аэрозольных фильтров, а также исследования структуры адсорбентов методом электронной микроскопии. В частности, в 1952 г. им впервые получены электронно-микроскопические снимки синтезированных также при его участии углеродных нанотрубок.

Л. В. Радушкевич – соавтор около 100 научных публикаций в ведущих отечественных научных журналах, автор учебников «Курс статистической физики» (1960) и «Курс термодинамики» (1971). Участник Великой Отечественной войны, полковник запаса, награжден орденом Красной Звезды, медалью «За победу над Германией». По: (Волощук, 2010)

монокристаллов происходит при низких давлениях, но с огромными линейными скоростями. Это событие, зарегистрированное в реестре открытий СССР, имело большое значение: впервые были получены нитевидные кристаллы вещества, метастабильного в условиях синтеза. Что касается нитевидных кристаллов в целом, то их считают высокоперспективными материалами, поскольку они также обладают уникальными свойствами, в том числе высокой прочностью и способностью сохранять упругость при высоких температурах.

С Леонидом Викторовичем Радушкевичем нам повезло гораздо больше. Во-первых, к 110-летию со дня его рождения А. М. Волощуком была составлена краткая биографическая справка, которую мы приводим здесь полностью.



Отец Леонида Радушкевича, Виктор Иосифович, рано осиротел. Заменял отца своим братьям и сестре, еще гимназистом зарабатывал деньги репетиторством. Окончив Московский университет, он уехал в Рязань, где стал основателем одной из лучших в городе гимназий

висела на волоске из-за дворянского происхождения, которое он скрывал, и уцелел он буквально чудом...

В партию он так и не вступил, несмотря на свой воинский и научный статус и секретный характер работы (что для того времени было явлением далеко неординарным), ни на какие компромиссы никогда не шел и часто высказывался прямо и недипломатично. Как вспоминала его дочь Зоя, когда умер Сталин, дед перекрестился и сказал: «Слава Богу, что сдох наконец этот проклятый тиран!». Позднее в ящике стола была найдена его рукопись под общим красноречивым заголовком «Антилениниана».

Ниже мы публикуем отрывки из личных дневниковых записей Леонида Викторовича Радушкевича.

Первая «аудитория» Лели Радушкевича – его младшие брат и сестра



К счастью, помимо сухих строчек этого сугубо официального документа в нашем распоряжении есть воспоминания внучки Радушкевича Татьяны Головенко, а также хранящиеся в ее архиве детские воспоминания и творческая биография, написанная самим ученым. Эти материалы дают возможность ближе познакомиться с непростой личностью человека, который не щадя сил работал на благо своей Родины, но при этом крайне негативно относился к сталинскому режиму. Что было и неудивительно: многие его родные и близкие погибли в результате репрессий. Судьба самого Радушкевича



Рязанская гимназия (вверху), где учился гимназист Л. Радушкевич (слева)



От первого лица: начало

В прожитой жизни человека есть всегда что-нибудь поучительное, даже в жизни Иудушки Головлева или Гобсека. Тем более в жизни научного работника. Именно поэтому я и решаю здесь сейчас выступить. У меня нет времени подробно рассказывать детали биографии. Я хотел бы только подчеркнуть некоторые ее штрихи и коснуться собственной характеристики как научного работника.

«Родился я с любовью к искусству... ребенком будучи, когда звучал орган в старинной церкви нашей, я слушал и заслушивался...» (А. С. Пушкин, «Моцарт и Сальери»). Этим органом, когда-то мощно звучащим, был для меня мой отец. Деятель эпохи 1905 г., по образованию естественник, закончивший Московский университет и уехавший в провинцию, хотя ему сулили университетскую кафедру. Он был увлечен идеями Писарева, Чернышевского, Дарвина, Бокля, Тимирязева и жаждал просветительской деятельности, о чем свидетельствуют его письма к моей матери.

В Рязани, куда он переехал, он был сперва преподавателем гимназии, а потом открыл частную гимназию, в которой состоял директором. Но главная его деятельность состояла в сплочении местной интеллигенции, где он завоевал не только доверие, но и какое-то магическое



влияние, сохранившееся на долгие годы после его смерти... Основная деятельность его состояла в развитии просвещения и особенно в пропаганде естественных наук. Под его влиянием создавались новые учебные заведения, например, частная женская гимназия Екимецкой. Многие пронесли это влияние на десятилетия.

Откуда была эта сила? В ней было что-то от его отца, моего деда, участника польского восстания 1863 г., сосланного в Сибирь на вечное поселение. Но вся эта бурная деятельность стоила здоровья моему отцу. Он быстро сгорел, получив чахотку в молодом возрасте, и умер в 1908 г., оставив жену с тремя маленькими детьми. Она быстро вышла вторично замуж, и семья увеличилась на двух детей от второго брака.

Похож ли я чем-нибудь на родителей? Мой отец был по описанию суров и всегда серьезен, занят наукой, мало интересовался искусством, а из поэтов любил лишь Некрасова и Никитина. Напротив, мать имела мягкий, женственный характер, унаследовав от своего отца любовь к искусству, литературе, которая передалась и мне. От моего отца, как я думаю, мне досталась способность к передаче мыслей в беседах, докладах и лекциях, которые я в известный период жизни много читал перед самой разнообразной аудиторией.

Физические приборы в музее Рязанской гимназии, где учился будущий ученый

Еще 13-летним ребенком, увлекшись ботаникой и энтомологией, я читал лекции перед аудиторией, состоявшей из моей няньки, братьев и сестер, причем сам рисовал карандашом таблицы для демонстраций. Позднее я сделал ряд докладов в молодежной организации «Дом юношества» в Рязани эпохи 1916–1918 гг. Эту способность делать доклады и читать лекции я рассматриваю как врожденный талант, если хотите, наследственный, и, может быть, зависящий от особенностей склада психики.

Интересно, что отец мой не вдавался в политику и не был, как я знаю, активен в период революции 1905 г. Но он чувствовал прогресс естествознания и говорил о нем страстно и искренне. Я тоже не умею делать докладов на политические темы, но по вопросам физики готов «болтать без конца», лишь бы были слушатели. Долго я увлекался чтением систематических лекций в вузах. Брался читать даже трудные самому (в смысле методическом) курсы, как то: теоретическую механику, теорию

электромагнитного поля, теорию атома, оптику и даже ...историю физики. Интересно, что я «расходился», главным образом, в маленькой аудитории на 10–20 человек и терялся в массовой аудитории, где «не различал людей» <...>

В период с 14 до 18 лет чувствовал два сильных увлечения: физика и музыка, а также литература. Все мы мальчишками чем-нибудь увлекались. Я помню, что под влиянием отчима я мечтал быть священником. Но устойчивое увлечение физикой было без всяких мыслей о какой-либо профессии...

Как это началось? Я помню, что к 14 годам (уже после смерти отца) я стал очень апатичным, ничто меня не интересовало, я грустил и по вечерам «всех жалел». Он как-то пришел в класс, вызвал меня и Шурку Скачкова и приказал нам ухаживать за очень большим (многоэтажным) гимназическим аквариумом. И мы стали ходить в кабинет естествознания, нам разрешали брать ключи и возиться там, сколько угодно. И вот однажды я обнаружил в кабинете дверь, которая была открыта совершенно случайно, и увидел физические приборы, но войти не решился. Зато как-то в другой раз, когда дверь была заперта, я влез на плечи Шурки и заглянул через верхнее окно над дверью, с замиранием духа обозревая все, что увидел.

Не буду говорить, как постепенно я втерся в доверие учителя физики Л. Л. Захаровского, который часто

возился в физическом кабинете. А вскоре я сам стал неотъемлемой принадлежностью этого кабинета, оставаясь там после занятий, а потом еще возвращался туда на весь вечер. Это мое увлечение было вскоре всеми замечено, и директор его очень поощрял.

От первого лица: творческая автобиография

Моя творческая жизнь прямо и почти непрерывно была связана с военно-химическим делом (ВХД). Именно там, волею судеб, я дал все то ценное, что мог дать науке.

Я вошел в эту область весной 1932 г., в период исканий, куда приложить мои знания для научной деятельности. Роковую роль здесь сыграли незабываемые впечатления от треков альфа-частиц в сконструированной мною вильсоновской камере. Тогда в Москве еще никто не работал с камерой Вильсона, и я начал постройку камеры в университете в 1928–1929 гг. по собственной инициативе.

Руководитель работы никаких советов мне не давал, но позволил использовать оборудование физического института МГУ и радиоактивный препарат (мезоторий). Помню, что первый же опыт в камере привел меня в восторг, когда на темном фоне при освещении дуговой лампой промелькнули четкие прямолинейные

Члены литературного кружка Дома юношества в Рязани, где во время разрухи и гражданской войны читал лекции юный Леонид Радушкевич (в заднем ряду второй справа), 1919 г.





Леонид Радушкевич с женой и дочерьми. 1936 г.

Т. Ю. ГОЛОВЕНКО:

Юность моего деда, совпавшая с революцией и гражданской войной, не была омрачена потерями и была интересной и вполне мирной: с литературным кружком, с домашними театральными постановками, с первыми научными опытами...

Еще в Рязани он познакомился и вскоре женился на Надежде Ивановне Серапионовой, девушке очень красивой, с живым и сильным характером. Родом из крепкой и здоровой семьи, в те годы она училась в Рязанском педагогическом институте. Поженившись, супруги Радушкевич стали жить в Москве, где у них родилось трое детей.

Семья шла «в гору», поскольку дедушка стал военным и служил в Военно-химической академии; карьера его как ученого и военного неуклонно развивалась. Перед войной ему дали квартиру в новом доме на ул. Госпитальный вал. Однако времена были страшные: советская власть, как танк, проехала и по его семье. Первым пострадал его отчим, бывший штабс-капитан М. И. Щербakov, который был расстрелян за дружбу со священником. А в 1937 г. был сослан в лагерь и вскоре расстрелян его брат, Виктор. Судьба самого Леонида Викторовича висела на волоске. Научная работа, которой он занимался, была секретной, поскольку относилась к области химической защиты. Подчиняясь правилам той жизни, он, конечно, скрывал свое дворянское происхождение, однако не расстался с семейными реликвиями. В общем, было, как говорится, за что сажать.

В их доме каждую ночь кого-нибудь «уводили», и моя бабушка, беременная третьим ребенком, в страхе припадала ухом к входной двери, чтобы убедиться, что идут не к ним. В шкафу у них, как и у многих других людей, тогда лежал заранее приготовленный узелок с вещами. То, что дедушка остался цел, настоящее чудо, так как даже ценность его как ученого не смогла бы его защитить, так как существовали «шарашки» – специальные лагеря, где трудились заключенные научные работники, инженеры и техники.

Нам, его внукам, больше всего запомнился его искренний интерес ко всем проявлениям жизни, будь то природные явления или воспитание детей, литература или музыка. С равным увлечением он вылавливал из пруда весной лягушачью икру, чтобы показать нам развитие головастика, и ловил бабочек, которых находил в старинном определителе; читал вслух рассказы Чехова своим домашним и ставил пластинки с любимой музыкой. С детским восторгом наблюдая солнечное затмение или радугу, он тут же давал этим природным феноменам понятное для нас объяснение. Свою довольно большую профессорскую зарплату он раздавал многочисленным родственникам, сам же был очень скромным. Ему совершенно был чужд карьеризм. Многие сослуживцы считали его чудаком, но почти все очень любили. На юбилей ему подарили статуэтку Дон Кихота...

и стал внимательно читать. Новая область неожиданно оказалась мне близкой, так как она примыкала к вопросам ионизации газов, которыми я пристально занимался в университете <...>

Педагогическая работа в этот период меня уже сильно тяготила своим однообразием, и я тогда уже начал понимать, что преподавание общей физики в средней школе много интереснее, чем в высшем учебном заведении, когда молодой ассистент не имеет самостоятельности, а всецело зависит от профессора,

треки альфа-частиц. Непрерывно работая над усовершенствованием методики и получая фотоснимки, я отходил от темы и все больше и больше задумывался над механизмом образования самих облачных треков.

Не нужно было быть мудрецом, чтобы понять, что каждый трек состоит из мельчайших капелек воды, представляя собой настоящее облако аэрозоля. Сразу поняв это обстоятельство, я обратился к дисперсным системам в газах. Тогда только что вышел перевод книги американца Гиббса «Аэрозоли», которую приобрел



За участие в Великой Отечественной войне подполковник Л. В. Радушкевич был награжден орденами Ленина и Красной Звезды

читающего общий курс физики... Я пытался подыскать себе работу в исследовательских институтах, но ничего интересного для себя не нашел. Помню, я отправился в Рентгеновский институт, намереваясь работать с эманационной машиной, но отсутствие ясно выраженной научной тематики по ядерной физике в этом институте меня тоже оттолкнуло. Мне предложили работать по инфракрасной спектроскопии в Институте минерального сырья, но и здесь для меня не было четко поставленного научного задания.

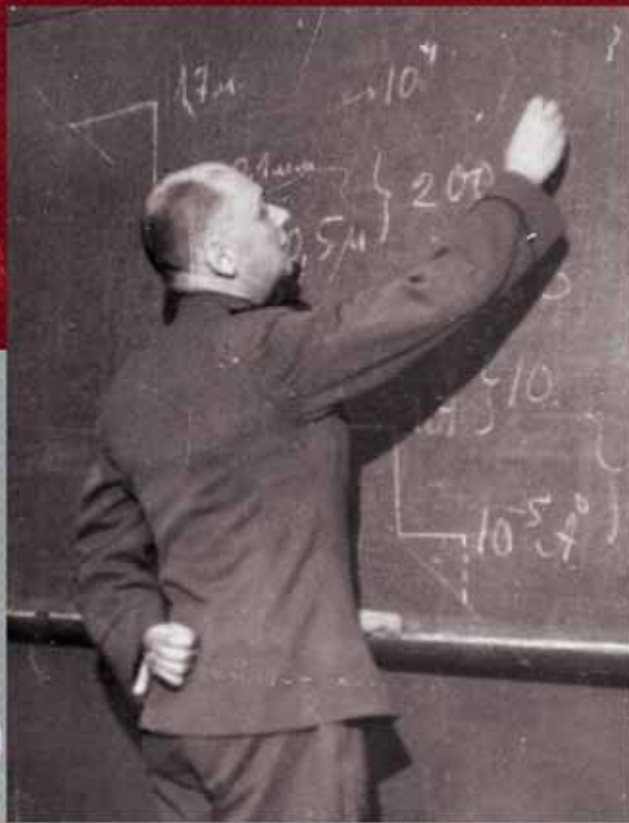
Примерно в конце 1931 г. у нас дома гостили Дубинины, а я в то время носился с идеями изучения свойств аэрозолей, возникающих в вильсоновской камере, которые и выкладывал Михаилу Михайловичу. Когда мы вышли с ним на кухню, чтобы он мог покурить, он неожиданно сказал, что у него в лаборатории предполагается наладить изучение аэрозолей в связи с разработкой защиты от вредных видов. В результате в 1932 г. я был зачислен научным сотрудником в противогазовую лабораторию Химико-технологического института (позднее – Военная академия химической защиты).

Когда я пришел в военно-химическое дело (ВХД), то в стране уже шла непрерывная подготовка к войне, и Красная армия, соответственно, перевооружалась и совершенствовалась. В те годы ВХД переживало полосу застоя, что было естественно, так как после окончания Первой мировой войны интерес

к нему ослабел, особенно у нас, когда на первый план были впервые выдвинуты задачи строительства и развития промышленности.

В военно-химическом деле настало время эмпирических расчетов, примитивных оценок действия отравляющих веществ и т.п. За два года до этого скончался Н. А. Шилов, оставив после себя единственную опубликованную работу по динамике сорбции (1929). Наследникам этих научных изысканий были исследователи чисто химического направления, совершенно чуждые вопросам гидродинамики и методам математического исследования. В вопросах динамики сорбции работы шли по чисто эмпирическому направлению установления опытных зависимостей параметров уравнения Шилова от разных факторов, что надолго заслонило физическое содержание его уравнения и саму сущность динамики сорбции. Творческая мысль в этом направлении не пробуждалась до 1938 г.

Л. В. Радушкевич: «Я писал уже об эвристическом складе своего ума, что видно по моим научным работам. Но надо сделать важную поправку. По отношению ко мне скорее речь должна идти не об эвристике, а о явно выраженном дилетантстве. Последнее вполне понятно. Я учился в самую смутную пору, когда настоящей системы обучения не могло и быть. Старшие классы гимназии для меня прошли в пору, когда гимназическое образование не только шаталось, но даже открыто высмеивалось, а в университете я попал в пеструю среду студентов и отходящих в сторону старых профессоров-математиков. Долгая педагогическая работа не давала мне хода вперед, и только порвав с нею уже 32-летним человеком, я самостоятельно занялся наукой. Отсюда явный дилетантизм: нет системы. Впрочем, я и не жалею об этом. Возможно, находясь под постоянным влиянием "маститого старца", я не приобрел бы самостоятельности во взглядах»



Л. В. Радушкевич: «Фразеология и содержательность! Для меня чтение лекций и докладов было спортом. Должно быть, я был бы незаурядным присяжным адвокатом или проповедником... Я готов был читать на любую тему. Все это указывает на способность духа, а не интерес к содержанию. Таков был, как я думаю, Рудин. Но и такие люди нужны, они привлекают интерес к определенным направлениям. Недаром я увлек целый ряд людей на поприще физики. И это мое главное предназначение»

дымовых шашек и т. п. В соседних областях ВХД также не было достигнуто успеха. Так, абсолютно ничего не было сделано в изучении распространения отравляющих веществ (ОВ) в атмосфере. Разработка новых ОВ шла в основном по испытанному химиками пути синтеза сложных органических молекул, которые всегда давали вещества, отлично поглощаемые активным углем.

Технология средств противохимической защиты (ПХЗ), как и всегда, следовала уровню общей технологии в стране. А эта отрасль тогда у нас была еще слаба, соответственно, средства индивидуальной и коллективной защиты также были примитивными. Следует заметить, что вся область ВХД, как мне кажется, извне представлялась настолько неинтересной, что не привлекала ни внимания, ни сил научных работников. Особенно она казалась чуждой для физиков. Тогда шел первый период расцвета волновой механики, с открытием позитрона и нейтрона ядерная физика делала колоссальные шаги, шли споры по поводу принципа неопределенностей. Естественно, физиков, а позднее и физико-химиков больше занимали эти вопросы. Во всяком случае, все ВХД представлялось заброшенным, мертвым делом, куда никому не хотелось совать нос.

И вот молодой физик (мне тогда был 31 год), уже имеющий большой преподавательский опыт, но мало искушенный в научной работе, окунулся в это болото и начал в нем «шарить» по всем направлениям. И все это происходило среди огромной массы типичных военных-строевиков, в большинстве солдафонов и держиморд. Ничего не понимая в научных вопросах, требуя только воинской дисциплины и преданности КП(б), они все время и непрерывно противодействовали проявлению любого творческого духа. Многие из них были честными вояками, но много было и проходимцев в военной форме и просто дураков.

Помню, как один сотрудник из учебного отдела на собрании нашей кафедры все время добивался от нас

Еще хуже обстояло дело с фильтрацией аэрозолей. Механизм этого процесса вообще не был известен, хотя было видно, что волокнистые фильтры обладают характерным свойством селективности. Я никогда не забуду дня, когда в знак окончательного доверия меня ввели в первую лабораторию, занимающуюся фильтрами. Первое, что я увидел, это огромная коллекция фильтрующих материалов. Чего только в ней не было! Самые разнообразные волокнистые и зерненные материалы растительного и животного происхождения, разные отходы промышленности. Рядом со всевозможными сортами хлопка, шерсти, льна, целлюлозы и вискозы располагались древесные стружки, опилки, стружки галалита, эбонита, порошки серы, канифоли, очесы текстильных фабрик и т. д. (даже гусиный пух считался тогда весьма секретным веществом).

Представления об аэрозолях были совершенно смутными, неясными и неверными. Испытания шли на людях с использованием табачного дыма с примитивными дымомерами, а также дифенилхлор-арсила. При изучении свойств дымов применялись колоссальные концентрации в больших камерах, с применением



Л. В. РАДУШКЕВИЧ:

Наши военные химики не смогли подняться до обобщений, но уже в 1920-х гг. германские специалисты подчеркивали, что химическое оружие в отличие от артиллерии обладает «объемным действием», т. е. распространяется в объеме. Однако и они не смогли точно выразить, в чем же заключается это действие. Поэтому введение дифференциального уравнения конвективно-диффузионного переноса как основного закона военно-химического дела, которое я приписываю целиком себе самому, считаю действительно открытием.

В основе этого закона лежат мои наблюдения и интересы в двух областях: физической кинетики и гидродинамики турбулентных течений. Первые впечатления сложились в поэтической обстановке летом 1936 г. вблизи Воскресенска. Гуляя по цветущей долине Истры, я сел у ручья и долго слушал его воркотню. Струйки воды среди травы давали неопределенный звук безо всякого музыкального тона, и все-таки казались непрерывно чередующимися-упорядоченными. Между тем в движении текущей воды был полный хаос. Но эта неупорядоченность давала какой-то порядок.

Уже зимой под действием этих мыслей я пошел на лекцию Колмогорова о «почти периодических функциях». Но это меня не удовлетворило, и я стал приглядываться к теории турбулентности. Работа Фэйджа и Тоупенда по наблюдениям течения воды вблизи стенки с помощью ультрамикроскопа показалась мне наиболее интересной. В моем ультрамикроскопе частицы дыма останавливались при закрывании крана, и я мог наблюдать их движение в вертикальном зазоре всего 40 м, т. е. проследить их движение в слое 20 м и ниже. Я часто видел, что они совершают колебательные (горизонтальные) движения, принимая вид ярких черточек. Амплитуда колебаний все уменьшалась, после чего частица превращалась в «звездочку», когда оседала на стенку. Все это меня восхищало и поражало. Пришлось ближе познакомиться с теорией турбулентного движения газов и жидкостей, но оказалось, что она к тому времени была еще плохо разработана. Поэтому я перешел к теории атмосферной турбулентности, где и увидел путь решения задачи через механизм диффузии.

Следующий этап – полигон летом 1938 г. На многочисленных полевых опытах на широких степных просторах мне удалось самому увидеть, как происходит распространение облаков газов, паров, дымов и туманов. Опыты ставились очень

Среди сотрудников Военно-химической академии РККА (Москва). 1930-е гг.

широко, с настоящими ОВ, в самых разнообразных метеорологических условиях. Последнее было особенно ценным, так как я воочию убедился, как распространяются облака при инверсии, при восходящих потоках в разное время дня и ночи <...> Долгие ночные опыты меня не утомляли, более того, занимали необычностью обстановки. Все казалось почти чудесным, феерическим. Поливка ОВ с самолета, заражение местности, грандиозный дымопуск с морскими шашками адасита, опыты на собаках, постановка дымзавес. Все было поучительным и интересным...

С такими впечатлениями я вернулся в Москву, где продолжил размышлять о явлениях, с которыми встретился летом. Меня занимало вихревое движение в атмосфере, но вскоре я увидел, что в метеорологии все пишут о грандиозных вихрях, с которыми в приземном слое мы не встречаемся. Тогда торжествовала свой триумф динамическая метеорология, обещающая полное раскрытие механизма циклонов и антициклонов и предсказание погоды. Но я видел, что нас интересует совсем другой комплекс явлений и другой участок атмосферы... Стохастическая теория турбулентных процессов только начала тогда развиваться, и уже было видно, что механизм диффузии поможет объяснить многое...

Лето 1939 г. очень мне памятно: в тесном дружном коллективе я, играючи, собирал по капелькам свой багаж, как пчела носит мед с цветков в улей. И уже в 1940 г. общая картина стала для меня ясной: все, буквально все встало на свои места. Композиция представилась мне совершенной, без лишних деталей, но и без диссонансов и изъянов



Л. В. Радушевич с дочерью Зоей

ответа, на чем должна строиться наша методика преподавания техники ПХЗ. Я нашел в себе смелость сказать, что за основу нам следует взять методику преподавания физики или физической химии. В ответ на эту реплику было грозно сказано, что это вздор, и что в основе должна лежать «методика тактической подготовки пехоты» («МТПП-33»), выпущенной тогда в виде приказа. Такие недоразумения и непонимания со мною происходили непрерывно.

Теперь, обращая взгляд в прошлое, я свое 22-летнее пребывание в области ВХД вижу в ином свете. В самом деле, со стороны я представлялся, должно быть, страшным чудачком, переодетым в несвойственный фигуре и облику костюм. Моя деятельность была в своем существовании страшно противоречива. Я не имел никакого военного образования, мой несколько расхлябанный облик и характер моих склонностей – все это никак не могло вязаться с требованиями, предъявляемыми мне со стороны военщины. Я был абсолютно невежественен в военных делах. И на это обращали внимание. Помню, один из преподавателей нашей кафедры в присутствии всего коллектива сказал, что он не понимает, почему

я работаю в области ПХЗ, и добавил, что она мне как физику должна быть абсолютно неинтересной, чуждой.

Но, очевидно, кроме формальной невозможности выйти из армии чем-то эта область меня все же привлекала, и я продолжал работать. Встречая только противодействие, я все больше и дальше углублялся в эту область, захватывая все более обширное поле деятельности. Нужно было иметь большой творческий напор, чтобы создать те общие положения, которые я развил на протяжении двух последующих десятилетий. Именно здесь обнаружилась главная особенность моих творческих сил – ум не очень глубокий, но широкий, а также способность к принципиальным обобщениям и страсть к эвристическим умозаключениям.

Теперь уже трудно говорить о том, насколько полезным я бы оказался на другом поле деятельности. Жизнь уже прожита, нет прежней быстроты ума и бодрости. Но во всяком случае можно считать, что ВХД оказалась благоприятной почвой для посева новых идей. Однако ОВ не были применены во Второй мировой войне, и мой творческий опыт оказался погребенным заживо. Но, возможно, и мои идеи оказали какое-то влияние на это решение командования противостоящих в войне стран – СССР и Германии, так как из моих выводов ясно были видны главные недостатки химического оружия. Таким образом, не исключено, что мои отрицательные суждения косвенно повлияли на отказ от применения химического оружия. Если это хоть в какой-нибудь ничтожной мере является верным, то я могу считать себя уже вознагражденным тем, что в этой войне, и без того жестокой, не было жертв отравляющих боевых веществ <...>

Теперь, в 1964 г., после более чем тридцати лет научной работы уже можно подводить итоги и давать самокритическую оценку того, что сделано. С холодным умом бросаю ретроспективный взгляд в прошлое и пытаюсь по справедливости оценить отдельные результаты своей творческой работы.

Собственная оценка степени важности трудов во многих биографиях бывает ошибочной. Так, говорят, Конан-Дойл считал важными свои романы, а Шерлока Холмса не ценил вовсе <...>

Работы по фильтрации по объему и длительности их выполнения занимают у меня первое место и характеризуют мой устойчивый интерес к этим вопросам и до настоящего дня, причем наиболее важные достижения у меня появились после ухода из армии. Исследования по динамике сорбции подробно изложены в моей докторской диссертации, а также в очень кратком изложении в статье в ДАН (1947). Я сам считаю, что эти вопросы являются важными, но они мною были не столько разработаны, как поставлены. Наконец, все остальные работы я считаю более второстепенными и отчасти неглубокими.

Как мы видим, открытие углеродных нанотрубок не упомянуто среди того, что ученый считал самыми важными своими достижениями. Более того, о них вообще нет ни слова в его творческой автобиографии. Очевидно, для Радушкевича это был лишь любопытный побочный результат исследований, связанных с поиском и изучением фильтрующих материалов для аэрозолей. И нельзя сказать, что это случилось из-за недостатка воображения, скорее, наоборот. Сам Радушкевич так говорил об этом свойстве своего ума и характера: «Следует упомянуть еще одно обстоятельство, может быть, важное для моей характеристики как научного работника, но могущее показаться нескромным в отношении моей собственной оценки себя. Как ни старайся скрывать свои идеи, а делиться с людьми нужно. Это особенно важно для ученых с эвристическим уклоном: они исходят идеями, разрабатывать которые им неохота.

Ум настолько живо воспринимает ту или иную задачу, что иногда внезапно, а часто после недолгого размышления, дает решение (часто неверное, неглубокое). Если все же оно является удачным, то немудрено, что другие легко его воспринимают и разрабатывают, хотя сам автор уже охладил к нему и занят другими вещами. Со мною так часто случалось. На разных заседаниях, съездах, коллоквиумах у меня неожиданно рождались идеи, которыми я открыто делился с окружающими. В результате нередко эти идеи заимствовались и вырастали в серьезные работы, причем их авторы не только не упоминали обо мне, а меня же самого иногда ругали. Иногда же и я сам, создав какое-то представление, не разрабатывал его и часто больше вообще к нему не возвращался.

Что с возу упало, то пропало. Теперь нельзя формально доказать, что я являлся автором ряда идей, подвеченных у меня и разработанных другими. Документального подтверждения у меня нет, и я в этом смысле беззащитен; остается только надеяться, что читатель этих строк поверит мне на слово. Но в науке это не является доказательством приоритета. Поэтому привожу ниже некоторые случаи заимствований – не для восстановления своего приоритета, а просто для своей собственной характеристики как ученого:

- теория образования космической пыли в связи с теорией происхождения солнечной системы (1933 г.);
- теория соосаждения частиц из потока (теория кольматажа) (1934 г.);
- турбулентная коагуляция аэрозолей (1936 г.) и т. д. <...>

А ниже Радушкевич напишет примечательные слова: «И опять, и снова встает один и тот же проклятый вопрос: можно ли согласовать собственную оценку своих работ со мнениями посторонних людей? То, что я считаю самым важным в моих работах, другие, может быть,

Умер Л. В. Радушкевич 8 ноября 1972 г. в больнице Академии наук от инсульта, случившегося, когда он наклонился к тумбочке, чтобы достать рецензируемую диссертацию. Похоронили его на Востряковском кладбище в Москве, где установили гранитный серый памятник, который он со свойственной ему любовью к порядку давно спроектировал, оставив место для своего имени

найдут неинтересным и несущественным. “По делам их судите их”. Для окончательного мнения вовсе неважно, как я шел к тем результатам. Здесь результат в итоге не зависит от формы пути, совершенно так же как в термодинамике для функции состояния. Поэтому часто оказывается колоссальная разница в оценке результатов, сделанная самим автором и, особенно в беге времен, – другими... Недалеко ходить за примером, если взять труд жизни, например, Эйнштейна, никак не смогшего согласовать теорию поля с теорией материи и пр. ...Пусть это и неверно, но я сам считаю главным в моих трудах общий закон военно-химического дела и принципы теории ПХЗ».

Открытие углеродных нанотрубок действительно не стало «звездным» для Радушкевича и Лукьяновича. Эта работа не имела продолжения, а ее результаты, опубликованные на русском языке, остались на многие годы незамеченными мировым научным сообществом. И все-таки сегодня мы отдаем должное исследователям, которые со своей далекой от совершенства микроскопической техникой смогли в обычной саже первыми разглядеть и описать структуры, которые сегодня называют материалом будущего. Немного удачи, и на нобелевском олимпе могли бы появиться и их имена.

Литература

Кац Е. А. Углеродные нанотрубки – фантастика наяву // *Энергия: экономика, технология, экология*. 2008. № 3. С. 42–49.

Петров А. К. О научной этике, Нобелевских результатах и патриотизме // *Наука в Сибири*. 17 января 2013 г. № 2 (2887).

Головенка Т. Ю. Концерт для кларнета с оркестром // *Дедушка, Grand-père, Grandfather... Воспоминания внуков и внучек о дедушках, знаменитых и не очень, с винтажными фотографиями XIX–XX веков / Сост. Е. Лаврентьева. М.: Этерна, 2011. С. 48–51.*