

Приоритет в области нанотехнологий Горного университета в Санкт-Петербурге — современного центра разработки новых наноструктурированных металлических материалов

УДК 669+620.3:544.72



А. Г. Сырков,
профессор кафедры общей и технической физики, докт. техн. наук,
эл. почта: Syrkov_AG@pers.spmi.ru



А. Б. Маховиков,
директор по информатизации Международного центра компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО,
канд. техн. наук,
эл. почта: Makhovikov_AB@pers.spmi.ru



В. В. Томаев,
доцент кафедры общей и технической физики,
канд. физ.-мат. наук,
эл. почта: Tomaev_VV@pers.spmi.ru



В. В. Тарабан,
доцент кафедры высшей математики,
кандидат физ.-мат. наук,
эл. почта: Taraban_VV@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Введение

1 ноября 2023 г. исполняется 250 лет со дня основания Санкт-Петербургского горного института (ныне университета). Накануне, 28 октября текущего года, исполнится 20 лет работы Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы», который проводится в Горном университете. Отмечать оба события будут в ноябре 2023 г. Несмотря на то, что, судя по цифрам лет, эти юбилеи «разнокалиберные», исторически они связаны более глубоко, чем может показаться на первый взгляд.

Сегодня благодаря независимым исследованиям нескольких творческих коллективов [1–3], где есть вклад и авторов этой статьи [4–6], достаточно убедительно доказан приоритет Санкт-Петербургского горного университета в области науки о нанотехнологиях. Это первенство, безусловно, связано с именем и трудами выдающегося физикохимика профессора Горного

Проведен анализ приоритетных работ в области нанотехнологий и ультрадисперсных веществ профессора Санкт-Петербургского горного института П. П. Веймарна (1879–1935), а также современных направлений нанотехнологических исследований Горного университета и 20-летней деятельности Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы».

Впервые рассмотрены публикации П. П. Веймарна, посвященные высокодисперсным цветным металлам (Cd, Ag, Cu, Te, Se) как объектам, которые иллюстрируют основные законы дисперсоидологии — науки «о свойствах поверхностей и процессах на них совершающихся». Обращено внимание на то, какую важную роль, по Веймарну, для формирования поверхностных свойств металла играет дисперсионная среда, в которой получают частицы металла. Показано, какие новые подтверждения это научное положение находит в исследованиях XXI в., в частности при получении наноструктурированных металлических продуктов методом твердотельного гидридного синтеза.

Выполнен анализ трех основных научных направлений Горного университета в области нанотехнологии и наноматериалов с точки зрения актуальности, эффективности реализованных проектов и полученных достижений мирового уровня.

Диссертации, подготовленные по всем трем направлениям, сообщение о научном открытии прошли апробацию на Международном симпозиуме «Нанозифика и наноматериалы» в Санкт-Петербургском горном университете. Обосновано, что этот симпозиум является хорошей площадкой для обмена инновационными знаниями в области наноматериалов, а также способствует усилению научных контактов с русскоязычными зарубежными специалистами и сохранению памяти о выдающихся ученых в области нанотехнологий, изучению и развитию их творческого наследия.

Ключевые слова: металлургия, нанотехнология, твердотельный синтез, молекулярное наслаивание, приоритет в науке, Горный университет, П. П. Веймарн, Международный симпозиум, наноматериалы.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.01

института (СПГИ) Петра Петровича Веймарна (1879–1935). Он первым концептуально сформулировал основы современного нанотехнологического подхода [7–9]. В XXI в. был организован Международный симпозиум по наноматериалам. Изучение нанотехнологий и наноматериалов, которое проводится в Горном университете не менее 117 лет, является неотъемлемой и большой частью его истории. Вклад профессора П. П. Веймарна в физикохимию ультрадисперсных систем освещен в отечественной [1, 4, 6] и зарубежной [5] научной литературе. Многие авторитетные эксперты позиционируют его в качестве основоположника науки о нанотехнологиях [1–3]. Но П. П. Веймарн, будучи горным

инженером по образованию, — он окончил горно-заводское отделение СПГИ — внес весомый вклад не только в фундаментальное естествознание [3], но и в изучение свойств и способов получения дисперсных цветных металлов [8–10]. Этот аспект его деятельности практически не анализировали. В канун юбилейных событий есть потребность и целесообразность осмысления имеющегося векового опыта Горного университета в области изучения, разработки, апробации и внедрения низкоразмерных материалов.

Цель представленной статьи — проанализировать научные направления Горного университета в области нанотехнологий и наноматериалов, опыт апробации результатов исследований на международном симпозиуме «Нанозифика и наноматериалы» и работы П. П. Веймарна по наноструктурированным цветным металлам.

Приоритетные работы П. П. Веймарна

Еще будучи студентом, П. П. Веймарн в 1906 г. сформулировал условия получения зольей разных веществ и представил математическое выражение для расчета показателя относительного пересыщения (S) коллоидного раствора (закон Веймарна). По Веймарну, «золи можно выделить из очень разбавленных растворов или очень концентрированных растворов, но не из растворов средней концентрации» [3]. При этом S рассчитывается по формуле

$$S = (Q - L)/L,$$

где Q — количество растворенного вещества; L — растворимость вещества.

Этот закон лег в основу золь-гель-технологии получения дисперсных веществ, одного из методов нанотехнологии [1, 2], его активно применяют на практике многие исследователи [11–13], которые крайне редко ссылаются на автора закона.

Творческой биографии и жизнеописанию П. П. Веймарна посвящено немало работ [14–16]. В них подробно рассмотрены перипетии очень непростой и в чем-то трагичной судьбы, в финале которой (с 1922 г.) Веймарн оказался в Японии, где преподавал в нескольких университетах и даже работал в частной компании. Деятельность Петра Петровича уже в 1924 г. была высоко оценена японским профессором Касима (Kashima) [17]; о его достижениях в области капиллярной химии и физикохимии ультрадисперсных веществ писали выдающиеся отечественные [1, 2] и зарубежные [18, 19] ученые. В частности, нобелевский лауреат по химии (1909) Вильгельм Оствальд называл исследования фон Веймарна гениальными [3, 14, 18].



Профессор Горного института (СПГИ) Петр Петрович Веймарн (1879–1935)

До 2012–2014 гг. никто, кроме авторов работ [1, 2, 20], не отмечал выдающуюся роль П. П. Веймарна в создании научной парадигмы современного нанотехнологического подхода. В публикациях иных авторов научной биографии Петра Петровича [14, 15, 21] обычно шла речь об огромном его вкладе в развитие коллоидной химии. Внешние профильные эксперты (академик РАН Н. Т. Кузнецов, В. Т. Калинин, В. М. Новоторцев; члены-корреспонденты РАН В. А. Жабров, А. И. Николаев и др.) обратили внимание на то, что П. П. Веймарн первым пришел к следующему выводу: «Между миром молекул и микроскопически

видимых частиц существует особая форма вещества с комплексом присущих ей новых физико-химических свойств — ультрадисперсное или коллоидное состояние, образующееся при степени его дисперсности в области 10^{-5} – 10^{-9} м, в котором пленки имеют толщину, а волокна и частицы — размер в поперечнике в диапазоне 1–100 нм» [1, 2, 22]. Новизна этого положения на дату формулирования (1910) состояла в том, что впервые было обращено внимание на особое состояние вещества в наноразмерных объектах и возможность получения их новых свойств. Эта мысль П. П. Веймарна вполне соответствует наиболее ранней научной парадигме нанотехнологии (с элементами предвидения), актуальной и в наши дни [3]. Авторы работ [1, 2, 20], тем не менее, не анализировали конкретные результаты и достижения Веймарна, на основании которых было сформулировано его прорывное научное положение.

Это было сделано в публикациях авторов представленной статьи, которые базировались на тщательном изучении оцифрованных томов научного журнала «Записки Горного института» за 1907–1915 гг. [4–6]. Именно в этом журнале П. П. Веймарн в приоритетном порядке печатал материалы о своих самых свежих исследованиях. Следом направлял статьи в немецкие журналы, публикации в которых уже к 1907 г. обеспечили мировую известность 28-летнему студенту Горного института из Санкт-Петербурга. Основные достижения работ П. П. Веймарна, позволившие сформулировать научную парадигму нанотехнологии следующие:

- на основании исследования более 200 коллоидных систем установил и математически описал главные условия перехода вещества в коллоидное (ультрадисперсное) состояние, заложив базисные принципы нанотехнологии дисперсных веществ, в том числе золь-гель-технологии (1906–1907);
- систематически изучал влияние концентрации растворов на вид и строение осадков, получив при этом

размер частиц твердой фазы в диапазоне 1–100 нм (1908–1909);

- показал ошибочность противопоставления коллоидов и кристаллоидов (1908–1912);
- разработал систематику дисперсных систем, оперируя введенными понятиями «дисперсоид» (размер частиц твердой фазы не более 0,1 мкм) и «дисперсид» (размер частиц — не более 5 нм); сформулировал основные законы дисперсоидологии, связав их с поверхностной энергией вещества [4, 8] (1910–1913);
- предложил и экспериментально обосновал метод получения любого вещества в состоянии твердых коллоидных растворов различной степени дисперсности, начиная с молекулярной [7, 23] (1910–1915).

В работах [7, 23] Петр Петрович предложил простой общий метод получения любого твердого тела в состоянии «аморфных» твердых растворов, любой степени дисперсности. Этот способ основан на быстром охлаждении разбавленных жидких растворов разных твердых тел в таких дисперсионных средах, которые и в чистом виде легко при быстром охлаждении затвердевают в стекла [7]. Особо он выделял перспективные для этого метода сплавы металлов, которые обладают хорошей теплопроводностью и при быстром охлаждении, достигаемом применением сжиженных газов, легко получаются в виде аморфных твердых растворов. При получении солеобразных соединений и металлоидов П. П. Веймарн рекомендовал применять водно-спиртовые растворы. В случае металлов и оксидов — расплавленную буру, расплавленное стекло или расплавленные соли. Так, для получения ультрадисперсного чистого металлического Cd целесообразно использовать в качестве дисперсионной среды расплавленный $CdCl_2$ [7]. Вообще, Петр Петрович в своих работах довольно часто обращался к получению и свойствам дисперсных цветных металлов: Ag, Cu [9]; Se [8, 9], Te [24].

Именно на цветных металлах П. П. Веймарн продемонстрировал основной закон дисперсоидологии и следствия из него. В частности, было показано, что с увеличением дисперсности (степени измельчения) металла происходит снижение плотности вещества и температуры плавления [8, 9, 24]. Ученый связал эти факты с увеличением роли поверхности и поверхностной энергии при измельчении кристаллов. В работе [9] сказано, что поверхностный слой металла «растворяет в себе до насыщения дисперсионную среду, что влечет за собой в подавляющем большинстве случаев понижение температуры плавления; одно и то же кристаллическое вещество, находящееся в различных дисперсионных средах, обладает существенно различными свойствами поверхности». Эта глубокая мысль позже нашла свое новое подтверждение при формировании дисперсных металлов в газовой среде разных гидридных восстановителей в условиях твердотельного гидридного синтеза металлов в работах [4, 6, 25].

Снижение температуры плавления в нанослоях Cu и Bi наблюдали В. Н. Пак и соавторы [26, 27], что представляет интерес для понимания механизма извлечения металла из медных концентратов [28].

К сожалению, работы весьма продуктивной научной школы П. П. Веймарна в России были прерваны в связи с революционными событиями 1919–1922 гг. [3, 14]. В 1915 г. Петр Петрович стал первым ректором Уральского горного института (УрГИ), оставался до 1919 г. еще и профессором СПГИ. Из-за боевых действий в Екатеринбурге УрГИ в 1919 г. был эвакуирован во Владивосток, где П. П. Веймарн работал проректором, а потом ректором Политехнического института. В 1922 г. Петр Петрович с семьей эмигрировал в Японию.

Одна из задач Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы» состояла в том, чтобы возродить память о профессоре П. П. Веймарне, его имя, а также освоить и приумножить его творческое наследие. Сегодня в периодической научной литературе, монографиях (включая зарубежные), учебниках и в Большой Российской Энциклопедии зафиксирован важный факт. Он состоит в том, что основоположником науки о нанотехнологиях является российский профессор П. П. Веймарн; своими исследованиями он на 45–50 лет опередил американца Р. Ф. Фейнмана (его на Западе часто позиционируют как пионера нанотехнологических исследований) [1, 3, 5].

Научные направления Санкт-Петербургского горного университета в области нанотехнологий и наноматериалов

Начиная с 2000-х годов во всем мире произошло резкое инициирование исследований и разработок в области нанотехнологий. В научной литературе случившееся часто называют нанотехнологической революцией или нанотехнологическим бумом [1, 2]. К тому времени термины «нанотехнология», «наноматериалы», «наноструктуры» были признаны научной общественностью. Во времена П. П. Веймарна и Р. Ф. Фейнмана такой терминологии не было, что не мешало Петру Петровичу получать в лаборатории СПГИ ультрадисперсные вещества с размерами частиц, соответствующих молекулярной дисперсности [7]. Правительство США уже в 2000 г. в рамках нанотехнологической инициативы открыло солидное госбюджетное финансирование американским специалистам в этой новой области науки и техники. В 2005–2006 гг. нанотехнологические исследования стали поддерживать на государственном уровне и в России. В частности, была создана Национальная нанотехнологическая сеть (ННС), куда вошли ведущие университеты России. Не остался в стороне и Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). Согласно Постановлению Правительства РФ № 498 от 02.08.2007 в СПГУ был создан Научно-образовательный центр по направлению «нанотехнологии», с финансированием на закупку оборудования в размере

129,5 млн руб. Научные исследования в области нанотехнологий проходили в рамках реализации Президентской инициативы «Стратегия развития nanoиндустрии» и Программы развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 г. По результатам исследований в Минобрнауки РФ ежегодно предоставляли подробные отчеты. Проводимые в СПГУ работы систематически обсуждали на Всероссийских совещаниях ректоров вузов и руководителей НОЦ «Нанотехнологии», которые проходили на площадках ведущих университетов ННС (НИЯУ «МИФИ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и др.).

Фундаментальные и прикладные нанотехнологические исследования в СПГУ выполняли по нескольким аналитическим ведомственным программам и госконтрактам, по государственным заданиям (проекты № 5279, № 8635 и № 8636), а также с 2020 г. — в рамках научных направлений Горного университета мирового уровня [29–31], которые ориентированы на решение проблем минерально-сырьевого комплекса страны и прежде всего — на обеспечение устойчивого развития комплекса, на энерго- и ресурсосбережение [32–34]. Среди этих направлений есть несколько, которые ориентированы на использование нанотехнологий и наноматериалов:

I. Наноструктурированные лигатуры с редкоземельными металлами для получения легких сверхпластичных сплавов (научный руководитель — проф. В. Ю. Бажин);

II. Наноструктурированные высокогидрофобные металлы и твердотельные методы их получения (научный руководитель — проф. А. Г. Сырков);

III. Плазменные нанотехнологии и новые материалы в минерально-сырьевом секторе (научный руководитель — проф. А. С. Мустафаев).

Первое и второе направления объединяют не только совместные статьи, книги и патенты, но и развитие работ научной школы металлургов Горного университета [35]. Особенность направления II состоит в том, что большинство его представителей являются учениками и последователями члена-корреспондента РАН В. Б. Алесковского, которые применяют идеи и методы его научной школы в области молекулярного наслаивания и химической сборки твердых веществ [36] для решения задач минерально-сырьевого сектора [4, 5, 30].

Направление III в области плазменных нанотехнологий имеет очень серьезные обоснования относительно фундаментальной науки. Дело в том, что у истоков научной школы плазменных нанотехнологий и энергетики СПГУ стоял профессор Л. А. Сена — автор научного открытия «эффект Сена» в этой области. Сейчас эту школу возглавляет профессор А. С. Мустафаев — тоже автор научного открытия (Диплом № 509). Открытие А. С. Мустафаева и соавторов носит название «Явление фазового превращения аморфного мелкодисперсного углерода в графен / графеноподобную структуру, интеркалированную цезием в среде низкотемпературной

газоразрядной цезиевой плазмы». Уже из названия следует, что речь идет о формировании материала, содержащего металл (Cs). Графеновые структуры выращивали также на Ni- и Al-подложках [31, 37]. Следует также обратить внимание, что открытия Л. А. Сена и более современное (2018) А. С. Мустафаева с соавторами сделаны на кафедре общей и технической физики (ОТФ) СПГУ. Здесь была сделана одна треть всех официально зарегистрированных научных открытий, выполненных сотрудниками СПГУ (СПГИ) [31].

Возвращаясь к характеристике трех направлений СПГУ в области нанотехнологий, отметим, что направление по наноструктурированным лигатурам развивается на кафедрах металлургии и автоматизации технологических процессов и производств СПГУ, и возглавляет его заведующий кафедрой металлургии профессор В. Ю. Бажин. Основные задачи, которые реализуются в рамках перспективных проектов по этому направлению, состоят в следующем:

- синтезе алюминиевых и магниевых лигатур с редкоземельными металлами, обладающих объемной или поверхностной упорядоченностью структур на микро- и наноразмерном уровне;

- разработке технологии получения дискретно армированного композиционного материала на основе алюминия с высокими механическими свойствами;

- разработке технологии получения листовых заготовок с повышенным уровнем механических свойств из высоколегированных алюминиевых и магниевых сплавов.

Созданные технологии внедрены в ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (КУМЗ), ОАО «Орион-Спецсплав-Гатчина», Audi AG (Германия). Разработки защищены патентами РФ и отмечены 11 медалями на крупнейших международных выставках изобретений и инноваций [2, 9, 35].

Направление II по наноструктурированным высокогидрофобным металлам ориентировано на решение фундаментальной проблемы — вернуть металлу в реальных условиях функционирования его «первородную» гидрофобность, присущую металлам с атомарно-чистой поверхностью, которую можно получить в сверхвысоком вакууме или в восстановительной среде, которая не содержит примесей кислорода или влаги [25]. По мнению авторов работ [25, 30], сделав поверхность металла гидрофобной, можно существенно повысить ее коррозионную устойчивость. Для этого были разработаны метод твердотельного гидридного синтеза металлов (ТГС) и наслаивание разноразмерных молекул модификаторов на металле [25, 30, 38]. В случае ТГС металлов, когда восстановление металла и модифицирование поверхности происходят практически одновременно и на одной установке, удается добиться получения супергидрофобных материалов с мизерной адсорбцией воды на уровне 0,1 монослоя, а также получить рекордную их жаростойкость на воздухе 0,1–0,4 мкг/см²

(100 ч, 900 °С) [25, 38]. Наиболее перспективные выполненные проекты по направлению II следующие:

- разработка получения наноструктурированных высокогидрофобных металлов (Cu, Al, Ni, Fe);
- создание наноструктурированных защитных покрытий на металлоконструкциях предприятий минерально-сырьевого комплекса;
- разработка методов контроля и моделирования нанотехнологических процессов и свойств наноматериалов.

Методы синтеза и полученные дисперсные металлические материалы апробированы в процессах смазки [39] и защиты от коррозии [25] и внедрены с экономическим эффектом на 12 предприятиях России и Беларуси, в том числе в ПАО «Лукойл», ООО «ГСК-Шахтпроект», НИИ «Энергосталь», в компаниях GMC и МК Констракшн и в ОАО «Белгорхимпром» [25, 30]. Выполненные научные разработки многократно отмечены золотыми и серебряными медалями на международных выставках изобретений и защищены патентами РФ. Под руководством профессора А. Г. Сыркова по тематике рассматриваемого направления успешно защищены 11 кандидатских работ и 2 докторские диссертации; из них 60 % работ защищены по фундаментальным дисциплинам. Особенность — каждая работа завершилась внедрением в производство, что подтверждено как минимум 1–2 актами.

С 2022 г. работа по направлению II ведется и в рамках тематики созданного в СПГУ Центра проблем переработки минеральных ресурсов и техногенного сырья. В частности, выполнены исследования по твердофазному синтезу наноструктурированных металлов как раздел госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по научно-исследовательской работе № FSRW-2020-0014 «Развитие междисциплинарных направлений комплексного освоения недр Земли и сохранения природы». Разработанный по направлению II ТГС металлов позволяет в десятки раз снизить углеродный след при восстановлении металлов из оксидного сырья по сравнению с известными аналогами [30].

Направление III в области плазменных нанотехнологий возглавляет заведующий кафедрой общей и технической физики профессор А. С. Мустафаев. Подробно о его научной биографии и достижениях можно прочитать в рубрике «Профессора-юбиляры» в этом выпуске. Актуальность направления связана с решением проблем критических технологий создания наноматериалов для минерально-сырьевого сектора и современных энергоэффективных технологий. Наиболее перспективные проекты, выполняемые по направлению III, следующие:

- новые технологии создания наноматериалов и методы диагностики плазмы;
- плазменные технологии получения алюминия для металлургии и водородной энергетики;
- разработка инновационной технологии получения сверхчистого белого корунда и сапфирового стекла.

Предложенные плазменные технологии апробированы в процессах получения алюминия совместно с АО «Корпорация «Энергоресурс», сверхчистого белого корунда — совместно с АО «СЕФКО», разработки успешно внедрены в Плазмофизической лаборатории Принстонского университета (США), Институте электрофизики и энергетики, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН [31, 37, 40].

Часть работ по направлению III проводят в сотрудничестве с Научным центром проблем Арктики и Антарктики СПГУ. Сделано научное открытие РФ № 660, 2018 (Диплом РАЕН № 509) в области графеновых структур и физики плазмы. На международных выставках разработок и изобретений получено более 20 золотых медалей и дипломов первой степени. По тематике рассматриваемого направления выполняется грант РНФ № 21-19-0139 (2021–2023 гг.). Важно отметить, что руководители и ключевые исполнители направлений II и III работают на кафедре общей и технической физики СПГУ.

Вопросами получения наноструктурированных металлов и модифицирования их поверхности, помимо кафедр общей и технической физики (ОТФ) и металлургии, занимаются также на кафедрах материаловедения и машиностроения СПГУ [41–43]. Такие вопросы возникают, например, при разработке методов маркировки металлов с помощью лазерного излучения [41, 44, 45]. Эти исследования ведут под руководством профессоров Е. И. Пряхина и А. П. Петковой.

По трем направлениям Горного университета мирового уровня в области нанотехнологий в последние годы успешно защищены пять докторских диссертаций (В. Ю. Бажин, Н. С. Пщелко, В. А. Сясько, К. В. Гоголинский, Ф. Ю. Шариков) и более 20 кандидатских диссертаций.

Международный симпозиум «Нанозифика и наноматериалы» в Горном университете

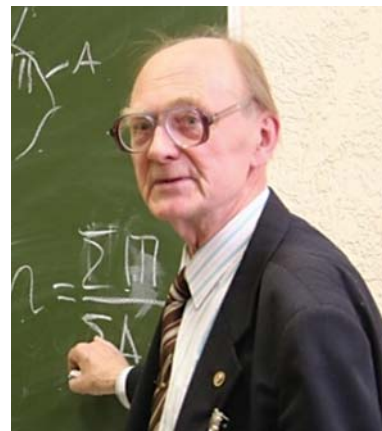
28 октября 2003 г. состоялось первое заседание научного семинара «Нанозифика и наноматериалы» (НИН). Председателем и организатором мероприятия, согласованного с руководством университета, был доцент кафедры ОТФ, докт. техн. наук А. Г. Сырков. Секретарь заседания — доцент кафедры ОТФ, канд. техн. наук Т. В. Стоянова. Основные слушатели семинара — студенты, всего присутствовали 30 человек, включая научного ассистента А. Г. Сыркова. В качестве почетных гостей выступили профессор кафедры химической нанотехнологии материалов и изделий электронной техники СПбГТИ (ТУ) В. Г. Корсаков и научный сотрудник Института теоретической и физической химии им. В. Оствальда Университета Лейпцига (Германия) доктор Л. В. Махова. Среди заслушанных и обсужденных на семинаре в 2003 г. докладов можно выделить работу студента группы ТНГ-02 Т. А. Гавриловой, посвященную доказательству монослойного состояния катионного ПАВ при адсорбции на металле.



**Профессор Э. И. Богуславский —
заведующий кафедрой ОТФ
в 1999–2010 гг.**



**Профессор И. Н. Белоглазов (1950–2011) —
декан химико-металлургического
факультета в 2010–2011 гг.**



**Профессор СПбГТИ (ТУ)
В. Г. Корсаков (1934–2012)
на НиН-2006**

С самого начала деятельности семинара (позднее симпозиума) его активно поддержали заведующий кафедрой ОТФ, профессор Э. И. Богуславский; заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств профессор И. Н. Белоглазов и упомянутый выше профессор В. Г. Корсаков из Технологического института. Именно Э. И. Богуславский отобрал из предложенных названий семинара то, которое существует уже 20 лет — «Нанопизика и наноматериалы». Он же стал инициатором того, чтобы согласовать с первым проректором служебную записку на проведение этого мероприятия с участием не только ведущих специалистов из России, но и зарубежных гостей из университетов Германии, США и других стран. Поэтому уже с 2003 г. семинар проходил с международным участием.

Особо надо отметить роль профессора И. Н. Белоглазова, создателя симплекс-метода в металлургии [46–48]. Он чрезвычайно внимательно отнесся к семинару и всячески его поддерживал в период 2003–2011 гг. Несмотря на занятость, он всегда находил время посетить заседания и выступить перед аудиторией. В 2004 г. он предложил А. Г. Сыркову написать обзорную статью о нанотехнологии металлов в журнал «Цветные металлы». Уже в 2005 г. вышел специальный тематический выпуск журнала «Наноструктурированные металлы и материалы», в 2006 г. — его англоязычная версия, где были опубликованы статьи докладчиков семинара НиН. В 2008 г. лучшие доклады на НиН были выбраны для публикации в виде статей в англоязычном журнале «CIS Iron and Steel Review». Все это делалось при непосредственной поддержке И. Н. Белоглазова и руководства Издательского дома «Руда и Металлы» (Москва).

В 2009 г. И. Н. Белоглазов любезно предоставил рабочей группе НиН и аспирантам А. Г. Сыркова помещение на территории своей кафедры. Это позволило в более комфортных условиях готовить заседания симпозиума, ставить опыты по твердотельному синтезу в рамках работ по диссертациям и госзаданиям.

После безвременной кончины И. Н. Белоглазова в 2011 г. его правопреемники по заведованию кафедрой (А. А. Кульчицкий и В. Ю. Бажин) сохранили возможность работать по направлению II в выделенном помещении вплоть до 2020 г. В результате в 2009–2020 гг. по направлению II были подготовлены 9 кандидатских и одна докторская диссертации; по распоряжениям ректора были успешно проведены 7 заседаний НиН.

Цель и задачи Международного симпозиума НиН изначально были связаны не только с тем, чтобы провести на высоком научном уровне обмен информацией в области физики, химии, технологии наноматериалов, востребованных в минерально-сырьевом комплексе [6]. Сегодня в спектр задач, решаемых при проведении симпозиума в Горном университете, которые можно считать миссиями НиН, входит сотрудничество с зарубежными учеными, представляющими Русский мир, а также сохранение памяти о великих ученых в области нанотехнологий, включая выдающихся выпускников и профессоров Горного института (университета), и изучение их творческого наследия [4–6]. Так, в 2019 г. симпозиум был посвящен 140-летию со дня рождения П. П. Веймарна; в 2020 г. — 160-летию со дня рождения его учителя Н. С. Курнакова; в 2017 г. [49] и в 2022 г. — юбилеям со дня рождения члена-корреспондента РАН В. Б. Алесковского — основоположника молекулярного наслаивания, который развил в XX–XXI вв. многие идеи профессора П. П. Веймарна. На симпозиуме НиН-2022 также впервые был отмечен на международном уровне юбилей основоположника плазменных нанотехнологий профессора Л. А. Сена [50].

В состав оргкомитета НиН входят ведущие профессора университетов и авторитетные специалисты зарубежных компаний из восьми стран (Россия, Беларусь, Бразилия, Великобритания, Испания, Финляндия, Вьетнам, Коста-Рика), среди них один академик РАН, три члена-корреспондента РАН, один член-корреспондент НАН Беларуси, 25 докторов наук, один автор научно-го открытия. С 2020 г. председателем оргкомитета НиН



является доцент А. Б. Маховиков, который не только возглавляет Центр компетенций под эгидой ЮНЕСКО, но и в качестве декана руководит Факультетом фундаментальных и гуманитарных дисциплин СПбГУ, где трудятся члены рабочей группы и научный руководитель НиН. Сопредседатели оргкомитета: член-корреспондент НАН РБ, профессор Н. Р. Прокопчук (подробнее см. рубрику «Профессора-юбиляры» в этом номере журнала) и профессор, научный руководитель симпозиума А. Г. Сырков.

За 20 лет работы в симпозиуме приняли участие более 2000 специалистов из 18 стран. Максимальное число стран-участниц — 11 стран было зафиксировано в 2018 г. Помимо названных выше при характеристике состава оргкомитета, участниками НиН в разные годы были ученые из Канады, Франции, США, Германии, Китая, Казахстана, Азербайджана, Италии, Австрии и Греции. Интересно, что на НиН-2022, в разгар СВО и русофобских настроений со стороны Запада, в симпозиуме участвовали представители семи стран. В 2014–2018 гг. ценную и подробную информацию о проведении симпозиумов НиН давал научный журнал «Конденсированные среды и межфазные границы» (издание ВАК, Scopus), где публиковали многостраничные статьи с фото заседаний НиН [49].



Заключение

117 лет нанотехнологических исследований в Санкт-Петербургском горном университете (СПГУ) стали важной вехой и большой частью истории СПГУ, которому в текущем году исполняется 250 лет. Родоначальником этих исследований и основоположником науки о нанотехнологиях является профессор кафедры физической химии Горного института (ныне университета) Петр Петрович фон Веймарн. Он в 1906 г. сформулировал основы получения ультрадисперсных веществ методом золь-гель-технологии, которая как разновидность нанотехнологии востребована и сегодня. Проанализированы публикации П. П. Веймарна по свойствам и получению высокодисперсных цветных металлов (Cd, Ag, Cu, Te, Se) в различных дисперсионных средах. Важная роль этой среды для формирования свойств поверхности металла подтверждена работами Веймарна и современными исследованиями. Показано, что развитие идей и законов Веймарна в XXI в. происходит в СПГУ в рамках трех научных направлений. Мировой уровень выполненных разработок подтвержден зарегистрированным научным открытием № 660, публикациями в высокорейтинговых научных журналах и монографиях, внедрением результатов не только на территории России, а также успешной апробацией работ на Международных научных форумах. Впервые сообщается об истории создания и особенностях деятельности Международного симпозиума «Нанозифика и наноматериалы», проводимого в Санкт-Петербургском горном университете с 2003 г.

На площадках симпозиума прошли успешную апробацию материалы научного открытия РФ № 660 (2018 г.), десятки диссертаций по нанотехнологии и смежным дисциплинам, выполненные в ведущих университетах России (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГТИ (ТУ), СПбГУ, ВГУ, МГУ, ЮзГУ, УрГАУ и др.), Беларуси (БГТУ). Начиная с 2003 г. на заседаниях НиН активно выступали докладчики академических институтов (ИХС РАН, ИВС РАН, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ИПМС НАН РБ и др.) и научных центров РФ (ЦНИИ КМ «Прометей», НИЦ «Курчатовский институт»), Германии (профессор М. Бржезинская), Университета г. Лейпцига (профессор Р. Зарган и др.).

Доклады участников Международного симпозиума НиН в 2013–2017 гг. опубликованы в 10 номерах рецензируемого журнала «Smart Nanocomposites», в 2018 г. — в двух номерах журнала «Smart Nanocomposites Letters» на английском языке (США). Труды НиН-2018 и НиН-2019 опубликованы в виде зарубежных научных монографий [51, 52] с индексацией в базе Scopus. Доклады участников НиН-2020 опубликованы на английском языке в научном журнале «Materials Science Forum» [40, 42, 43 и др.]. С 2021 г. лучшие доклады НиН в виде статей печатаются в журнале «Цветные металлы» Издательского дома «Руда и Металлы» (Москва), являющегося информационным партнером НиН. В последние годы компаниями-соучастниками Международного симпозиума НиН выступают Евразийская горно-геологическая группа и IMC Montan (Ай Эм Си Монтан). Одним из значимых результатов обсуждения приоритета работ и творческого наследия П. П. Веймарна на симпозиуме в 2015–2022 гг. стала подготовленная статья о нем, опубликованная в Большой Российской Энциклопедии [3]. На «полях» НиН заключено немало хоздоговоров (18017, 19086, 19016 и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

*Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 5–13
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.01*

PRIORITY IN THE FIELD NANOTECHNOLOGIES OF THE MINING UNIVERSITY IN SAINT PETERSBURG — A MODERN CENTRE FOR THE DEVELOPMENT OF NEW NANOSTRUCTURED METALLIC MATERIALS

Information about authors

A. G. Syrkov, Professor at the Department of General and Technical Physics¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: Syrkov_AG@pers.spmi.ru

A. B. Makhovikov, Director for Informatization of the International Competence Center in Mining and Engineering Education under the auspices of UNESCO¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Makhovikov_AB@pers.spmi.ru

V. V. Tomaev, Associate Professor at the Department of General and Technical Physics¹, Candidate of Physics & Mathematics Sciences, e-mail: Tomaev_VV@pers.spmi.ru

V. V. Taraban, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics¹, Candidate of Physics & Mathematics Science, e-mail: Taraban_VV@pers.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

The authors of this paper analyzed some priority papers on nanotechnology and ultradispersed substances authored by professor of the Saint Petersburg Mining Institute Petr P. Weymar (1879-1935), as well as some modern trends in the nanotechnology research conducted by the Mining University and in the 20-year long history of the International Conference “Nanophysics and

Nanomaterials”. This is the first paper that considers Petr P. Weymar’s publications devoted to highly dispersed non-ferrous metals (Cd, Ag, Cu, Te, Se) as objects that illustrate the basic laws of dispersoidology — the science “about the properties of surfaces and the processes occurring on them”. The paper stresses the key role that, according to Weymar, the dispersion medium, in which metal particles occur, plays in the formation of surface properties of metal. The paper cites some research studies from the 21st century that provide new data confirming the above statement. In particular, when solid-state hydride synthesis is used to produce nanostructured metal products.

The authors looked at three major research areas with the Mining University in the field of nanotechnology and nanomaterials in terms of relevance, efficiency of implemented projects and world-class achievements. The first area of research is implemented by the Department of Metallurgy and involves the development of nanostructured master alloys with rare earth metals for obtaining light superplastic alloys. Research in the area of nanostructured highly hydrophobic metals and solid state synthesis techniques is carried out by the Department of General and Technical Physics together with the Mining University’s Centre for Problems of Processing Mineral Resources and Secondary Raw Materials. Research in the area of plasma technologies is also implemented by the Department of General and Technical Physics together with the Mining University’s research centres and a number of institutes of the Russian Academy of Sciences. Dissertations prepared in all three research areas, as well as the scientific discovery made, were tested at the Nanophysics & Nanomaterials International Conference, which took place at the Saint Petersburg Mining University. It would be fair to say that the above mentioned forum provides an excellent platform to exchange innovative knowledge in the field of nanomaterials, and serves to strengthen scientific ties with Russian-speaking specialists abroad, cherish the memory of outstanding nanotechnology scientists, explore and promote their heritage.

Key words: metallurgy, nanotechnology, solid state synthesis, molecular layering, priority in science, Mining University, P. P. Weymarn, International Conference, nanomaterials.

References

- Margolin V. I., Zhabrev V. A., Lukianov G. N., Tupik V. A. Introduction to nanotechnology. St Petersburg : Lan, 2012. 464 p.
- Kuznetsov N. T., Novotortsev V. M., Zhabrev V. A., Margolin V. I. Fundamentals of nanotechnology. Moscow : Izdatelstvo "Binom", 2014. 397 p.
- Petr P. von Weymarn. Great Russian Encyclopedia. Ed. by S. L. Kravets. Available at: bigenc.ru/c/veimarn-piotr-petrovich-fon-b63837 (Published: 5 April 2023).
- Syrkov A. G. On the priority of Saint Petersburg Mining University in the field of science about nanotechnology and nanomaterials. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 221. pp. 730–736.
- Syrkov A. G., Pleskunov I. V. The study of low-dimensional systems in Saint-Petersburg Mining University: from P. P. Weimarn to the present days. Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-engineering. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2019. pp. 139–146.
- Pleskunov I. V., Syrkov A. G. Development of research of low-dimension metal-containing systems from P. P. Weimarn to our days. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 231. pp. 287–291.
- Weymarn P. P., Kagan I. B. A simple general method to obtain a body in the state of solid colloidal solutions of any dispersion starting from the molecular one. *Journal of Mining Institute*. 1910. Vol. 2. pp. 398–400.
- Weymarn P. P. A new classification of the states of matter and the basic law of dispersoidology. *Journal of Mining Institute*. 1912. Vol. 4. pp. 128–143.
- Weymarn P. P. A relationship between the dispersion degree of a solid crystal body and its melting point. *Journal of Mining Institute*. 1911. Vol. 3. pp. 100–102.
- Weymarn P. P. On the electric conductivity of metals and their alloys from the points of view of dispersoid chemistry. *Journal of Mining Institute*. 1911. Vol. 3. pp. 349–353.
- Kumar A., Prajapati C. S., Sahay P. P. Modification in the micro-structural and electrochromic properties of spray-pyrolysed WO₃ thin films upon Mo doping. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2019. Vol. 90, No. 2. pp. 281–290.
- Belousov A. L., Patrusheva T. N. Electrochromic oxide materials. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014. Vol. 6, No. 7. pp. 698–710.
- Zhang H., Wang Y., Zhu X., Li Y. Bilayer Au nanoparticle-decorated WO₃ porous thin films: on chip fabrication and enhanced NO₂ gas sensing performances with high selectivity. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2019. Vol. 280. pp. 192–200.
- Khisamutdinova N. V. Chemist Petr P. von Weymarn in Russia and Japan. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk*. 2011. No. 5. pp. 134–141.
- Filatov V. V. Von Weymarn – the first rector of the Ural Mining Institute. *Uralskiy geologicheskii zhurnal*. 2000. No. 2. pp. 167–194.
- Volkov V. A., Kulikova M. V. Russian academics. 18th – early 20th centuries. Biological and biomedical sciences: A biographical dictionary. St Petersburg : Izdatelstvo Russkogo khristianskogo gumanitarnogo instituta, 2003. 544 p.
- Kashima K. An eminent Russian chemist. *Industrial and Engineering Chemist*. 1924. Vol. 16, No. 5. pp. 540–541.
- P. P. von Weimarn, 1879–1935. *Kolloid – Zeitschrift*. 1936. Bd. 74, No. 1.
- Capillary chemistry. Ed. by K. Tamaru. Translated from Japanese by A. V. Khachoyan. Moscow : Mir, 1983.
- Zhabrev V. A., Kalinnikov V. T., Margolin V. I., Nikolaev A. N. et al. The physico-chemical processes behind synthesis of nanosized items. St. Petersburg : Izdatelstvo Elmor, 2012. 328 p.
- Shorin A. G. An article about Petr P. von Weymarn for the Russian Wikipedia. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2016. No. 2. pp. 97–100.
- Weimarn P. P. von Die Theorie der Herstellung und der Stabilität Kolloider Losunger. *Kolloidchemische Beihefte*. 1910. Bd. 1. ss. 396–422.
- Weymarn P. P. The crystallization method for obtaining disperse systems and factors defining their stability in relation to the theory of solids dissolved in liquids. *Journal of Mining Institute*. 1912. Vol. 4. pp. 115–127.
- Weymarn P. P. On the problem of the nature of disperse systems. *Journal of Mining Institute*. 1911. Vol. 3. pp. 136–140.
- Syrkov A. G., Prokopchuk N. R. Dispersed iron obtaining by the method of solid state hydride synthesis and the problem of hydrophobicity of metal. *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 21. pp. 16–22.
- Pak V. N., Golov O. V., Grabov V. M. et al. Porous glass as a synthesis reactor for bismuth nanoparticles. *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 84, No. 10. pp. 1600–1604.
- Pak V. N., Golov O. V., Formus D. V. Evolution of copper (II) oxide nanoparticles in porous glass matrix. *Smart Nanocomposites*. 2016. Vol. 7, No. 1. pp. 27–31.
- Lutskiy D. S., Ignatovich A. S. Understanding the hydrometallurgical recovery of copper and rhenium when processing off-grade copper concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. P. 723–729. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.11.
- Bazhin V. Y., Aryshenskii E., Hirsch J., Kawalla R. et al. Impact of Zener-Hollomon parameter on substructure and texture evolution during thermomechanical treatment of iron-containing wrought aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29, Iss. 5. pp. 893–906.
- Syrkov A. G., Yachmenova L. A. Features of obtaining metallurgical products in the solid-state hydride synthesis conditions. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 651–662.
- Popova A. N., Klimenkov B. D., Grabovskiy A. Yu. Scientific school for plasma nanotechnology and energy at the Mining University. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 29, No. 2. pp. 317–336.
- Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvoynikov M. V., Buslaev G. V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 428–438.
- Baake E., Shpenst V. A. Resent scientific research on electro-thermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 660–668.
- Nedosekin A. O., Reyshakhrit E. I., Kozlovskiy A. N. A strategic approach to assessing the economic resilience of Russia's mineral deposits. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 354–360.
- Brichkin V. N., Vorobiev A. G., Bazhin V. Y. Mining Institute's metallurgists: a tradition serving the country, science and production industry. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 4–13.
- Sosnov E. A., Malkov A. A., Malygin A. A. The nanotechnology of monomolecular layering in the production of inorganic and hybrid materials for different applications (Review). I Molecular layering method: How it originated and evolved. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2021. No. 8. pp. 967–986.
- Smerdov R. S., Mustafaev A. S., Spivak Yu. M. et al. Composite nanostructured materials for plasma energetic systems. Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2019. pp. 229–236.
- Syrkov A. G., Kushchenko A. N., Silivanov M. O., Taraban V. V. Nanostructured regulation of the surface properties and hydrophobicity of nickel and iron by solid-state and modifying methods. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. pp. 54–59.
- Silivanov M. O., Vinogradova A. A. Research of the parameters of boundary friction of tribosystems in the introduction of surface modified Al-samples. *Journal of Physics: Conference series*. 2019. Vol. 1384, No. 1. 12067-4.
- Popova A. N., Kison V. E., Sukhomlinov V. S., Mustafaev A. S. Development of new plasma technology method in synthetic materials. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 87–93.
- Pryakhin E., Malyushin I. Research of nanostructuring of metal surface by the Nanobar code processing. New Materials Preparation, Properties and Applications in the Aspect of Nanotechnology. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2020. pp. 197–204.
- Ermakov S. B., Vologzhanina S. A., Ermakov B. S. Features of obtaining Ni – Cr – Fe powders by plasma Atomization. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 1–7.
- Khalimonenko A. D., Zbotnikov E. G., Gorshkov L. V., Popov M. A. Influence of the microstructure of cutting ceramics on the efficiency of the machining process. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 21–27.
- Ganzulenko O. Y., Petkova A. P. Simulation and approbation of the marking laser process on metal materials. *Journal of Physics: Conference series*. 2021. Vol. 1753, Iss. 1. 012016.
- Pryakhin E. I., Ligachev A. E., Kolobov Y. R. et al. Assessment of the thermal effect on the surface of metal structural materials on the stability of laser – induced code readability. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 47–54.
- Goncharova M. V., Mikhailova M. S. Two dynasties of mining engineers: the Beloglaazovs and the Thiemes – two branches of the same family – for a century and a half serving the Mining University. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 7. P. 90–96.
- Gerasimova I. G., Oblova I. S. Scientific heritage of professor G.V. Illuvieva. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 4. P. 52–56.
- Beloglazov I., Krylov K. An Interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data. *Mathematics*. 2022. No. 10. 2959. DOI: 10.3390/math10162959.
- Syrkov A. G. The Nanophysics and Nanomaterials International Conference devoted to V. B. Aleskovskiy's 105th birthday. *Condensed Matter and Interphases*. 2018. Vol. 20, No. 1. pp. 165–173.
- Sena L. S., Sena S. S., Sena Kh. S. et al. L. A. Sena: A path to discovery. *Proceedings of the Nanophysics and Nanomaterials International Conference*. St Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gorniy universitet, 2022. pp. 255–271.
- New Materials. Preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2020. 249 p.
- Applied aspects of nano-physics and nano-engineering. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2019. 308 p.