

Том 93, Номер 7

ISSN 0869-5873

Июль 2023



# ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

---

Том 93, номер 7, 2023

---

## С кафедры президиума РАН

- Минерально-сырьевая база России: состояние и перспективы 603  
*В. А. Крюков*
- Об изучении и освоении стратегических полезных ископаемых  
в рамках социально-экономически ориентированных проектов  
полного цикла 605  
*Н. А. Горячев, В. Ю. Фридовский, А. Е. Будяк, И. Н. Горячев,  
С. В. Ефремов, М. В. Кудрин, Ю. И. Тарасова*
- Роль металлогенических исследований в прогнозе перспективных территорий.  
От моделей к объектам 614  
*А. Ю. Цивадзе, В. Е. Баулин, Г. В. Костинова, А. А. Бездомников*
- Селективное извлечение лития из минерального, гидроминерального  
и вторичного сырья 623  
*Л. И. Леонтьев, О. В. Заякин, А. И. Волков*
- Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического  
суверенитета России с учётом состояния минерально-сырьевой базы 631

## К 300-летию Российской академии наук

- А. Ю. Скрыдлов*  
Императорская академия наук и организация статистических  
исследований в России 646

## Организация исследовательской деятельности

- В. П. Заварухин, О. А. Антропова*  
Актуальные тенденции и перспективы развития вузовского сектора  
русской науки 655

## Проблемы экологии

- А. В. Семёнова, О. Б. Поповичева, Ю. А. Завгородняя, М. А. Чичаева,  
Р. Г. Ковач, Н. Е. Кошелева, Т. М. Минкина, Н. С. Касимов*  
Аэрозольное загрязнение московского мегаполиса полиароматическими  
углеводородами: сезонная изменчивость и токсикологические риски 669

## Из рабочей тетради исследователя

- Л. А. Хамидулина, П. Д. Тобышева, О. Е. Черепанова, И. С. Пузырев, А. В. Пестов*  
Карбоксиалкильные производные хитозана как перспективные регуляторы  
роста и развития лекарственных растений 684

## Этюды об учёных

- А. Ю. Гагаринский*  
Из плеяды титанов атомного века  
К 120-летию со дня рождения академика А.П. Александрова 692

## Размышления над новой книгой

- О. Н. Шелегина, Г. М. Запорожченко*  
Ядро потенциала сибирской науки 705

## Официальный отдел

- Награды и премии 711
-

# CONTENTS

---

**Vol. 93, No. 7, 2023**

---

## **From the Rostrum of the RAS Presidium**

Mineral resource base of Russia: state and prospects 603

*V. A. Kryukov*

On the study and development of strategic minerals within the framework of socio-economically oriented projects of the full cycle 605

*N. A. Goryachev, V. Yu. Fridovsky, A. E. Budyak, I. N. Goryachev, S. V. Efremov, M. V. Kudrin, Yu. I. Tarasova*

The role of metallogenic research in the forecast of promising territories. From models to objects 614

*A. Yu. Tsvadze, V. E. Baulin, G. V. Kostikova, A. A. Bezdomnikov*

Selective extraction of lithium from mineral, hydromineral and secondary raw materials 623

*L. I. Leontiev, O. V. Zayakin, A. I. Volkov*

Problems of development of the metallurgical industry to ensure the technological sovereignty of Russia, taking into account the state of the mineral resource base 631

## **To the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences**

*A. Yu. Skrydlov*

Imperial Academy of Sciences and Organization of Statistical Research in Russia 646

## **Organization of research activities**

*V. P. Zavarukhin, O. A. Antropova*

Current trends and prospects for the development of the university sector of Russian science 665

## **Ecological problems**

*A. V. Semyonova, O. B. Popovicheva, Yu. A. Zavgorodnyaya, M. A. Chichaeva, R. G. Kovach, N. E. Kosheleva, T. M. Minkina, N. S. Kasimov*

Aerosol pollution of the Moscow metropolis with polyaromatic hydrocarbons: seasonal variability and toxicological risks 669

## **From the researcher's notebook**

*L. A. Khamidullina, P. D. Tobysheva, O. E. Cherepanova, I. S. Puzyrev, A. V. Pestov*

Carboxyalkyl Chitosan Derivatives as Promising Regulators of the Growth and Development of Medicinal Plants 684

## **Profiles**

*A. Yu. Gagarinsky*

From a pleiad of titans of the atomic age  
To the 120th anniversary of Academician A.P. Alexandrov 692

## **Reflections on a new book**

*O. N. Shelegina, G. M. Zaporozhchenko*

The core of the potential of Siberian science 705

## **Official Section**

Awards and prizes 711

---

## МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА РОССИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

DOI: 10.31857/S0869587323070125, EDN: HVWCBJ

11 апреля 2023 г. на заседании президиума РАН обсуждались состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации. Учитывая важность рассматриваемых проблем, в обсуждении приняли участие ведущие учёные профильных институтов РАН, руководители министерств и ведомств, представители Государственной думы, администрации Президента РФ.

Минерально-сырьевой потенциал нашей страны позволяет обеспечить решение задач национальной экономики и национальной безопасности исходя из стратегических целей при любых сценариях развития мировой ситуации, отмечается в постановлении президиума РАН, принятом по результатам обсуждения. Динамично меняющиеся геополитические процессы, переход мировой экономики на новый технологический уклад, трансформация мирового рынка требуют разработки многовариантных долгосрочных планов развития и освоения минерально-сырьевых ресурсов.

Большая часть стратегических металлов (уран, марганец, хром, титан, алюминий, цирконий, гафний, бериллий, литий, рений, редкоземельные металлы, висмут, кадмий, галлий), необходимых для обеспечения высокотехнологичных наукоёмких производств, включая атомную промышленность, микроэлектронику, авиационную и космическую отрасли, машиностроение, металлургию, относятся или потенциально могут быть отнесены к дефицитным. Эксперты РАН отмечают, что с учётом низкого внутреннего спроса и недостаточного уровня имеющихся в распоряжении промышленности технологий переработки руд минерально-сырьевая база дефицитных видов стратегического сырья требует дополнительного внимания.

К сожалению, достоверные сведения о запасах, закономерностях размещения и формах нахождения редких рассеянных стратегических металлов (индий, теллур, рений, гафний, скандий, селен, кадмий, галлий, германий, висмут), извлекаемых в качестве попутных компонентов, отсутствуют. Это приводит к тому, что редкие и рассеянные металлы в отсутствие рентабельных

технологий не извлекаются при переработке и складываются в хвостохранилищах.

Остра проблема использования комплексных руд редкоземельных металлов. Ежегодная их добыча составляет около 120 тыс. т, но извлечение не осуществляется. В стране нет промышленных технологий разделения редкоземельных металлов, извлечения марганца, хрома, ниобия, рения. И это несмотря на значительный опыт научного обоснования таких технологий и опытно-промышленных проработок. При наличии существенных запасов литья, бериллия и других редких металлов добыча их не производится. Российский рынок попутных металлов в сравнении с главными металлами незначителен. Это приводит к потерям стратегических металлов при переработке комплексных руд.

Развитие минерально-сырьевой базы стратегических металлов сдерживается низким спросом внутри страны, преобладающим экспортом продуктов низкого передела, отсутствием прогрессивных технологий добычи, обогащения руд и извлечения металлов.

На заседании отмечалось, что институты, находящиеся под научно-методическим руководством РАН, получили принципиально новые результаты, касающиеся закономерностей размещения крупных и уникальных месторождений стратегических металлов, минералов-концентраторов редких и рассеянных элементов, разработали геолого-генетические модели провинций и месторождений. Развиваются геофизические методы поиска и разведки рудных месторождений, разрабатываются соответствующее оборудование, новые системы добычи и обогащения руд, селективного извлечения металлов из комплексных руд и техногенных отходов. Однако эти результаты не используются главным образом потому, что ведущие горнодобывающие компании не заинтересованы в добыче редкоземельных металлов. Они производят сырьё главным образом на экспорт и не стремятся организовать глубокую переработку руд, что приводит к потерям рассеянных металлов, таких как рений, индий, галлий, германий и другие, столь необходимых для развития высокотехнологичной промышленности.

Чтобы преодолеть негативный сценарий, нужно перейти к разработке специальной федеральной научно-технической программы, направленной на обеспечение комплексного сопровождения геологоразведочных работ, добычи и промышленной переработки твёрдых полезных ископаемых, а также на ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами. Разработка и реализация программы предполагают не только создание технологий от стадии прогноза и поиска месторождений до глубокой переработки высокотехнологичных видов сырья, но также запуск производства отечественного оборудования, подготовку кадров и, что не менее

важно, формирование устойчивого внутреннего спроса на получаемую продукцию высоких переделов. Всё это предполагает переход к управлению и государственному регулированию на основе проектов полного инновационного цикла. Достижение целевых ориентиров программы потребует консолидированных усилий всех вовлечённых в процесс её реализации сторон — недропользователей, потребителей соответствующей продукции, государства и общества.

Предлагаем вниманию читателей четыре статьи, подготовленные на основе устных докладов, заслушанных в ходе заседания.

## ОБ ИЗУЧЕНИИ И ОСВОЕНИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В РАМКАХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОЕКТОВ ПОЛНОГО ЦИКЛА

© 2023 г. В. А. Крюков<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: kryukov@ieie.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.06.2023 г.

После доработки 10.06.2023 г.

Принята к публикации 12.06.2023 г.

В статье представлен подход к управлению процессами изучения, освоения и использования обширного минерально-ресурсного потенциала России. Эти процессы в современной экономике во всевозрастающей степени ориентируются на достижение высокой социально-, эколого- и экономической отдачи. Последняя характеризуется не только возможностью производства тех или иных товаров и услуг и достижения связанных с ними финансово-экономических результатов, обусловленных наличием доходов рентного характера, но и перспективой реализации целенаправленной структурной и всеобъемлющей научно-технической политики. Масштабы и роль минерально-сырьевого и в целом природно-ресурсного сектора настолько значительны, что шаги и меры в научно-технологической, инновационно-ориентированной и образовательной областях в его рамках приобретают определяющее значение для экономики в целом. С этой точки зрения процессы изучения, освоения и использования значительной части полезных ископаемых имеют стратегический определяющий характер. Автором обосновывается и предлагается подход к решению важнейших проблем трансформации структуры экономики страны не за счёт, а при помощи природных ресурсов.

**Ключевые слова:** природные ресурсы (полезные ископаемые), управление процессами изучения, освоения и использования, ресурсный режим, социально-, эколого-, экономическая отдача, государственное регулирование, взаимодействие природо-, недропользователей и государства, отечественный опыт, направления формирования отечественной модели.

DOI: 10.31857/S0869587323070058, EDN: RQTZPI

**Современная динамика процессов изучения, освоения и использования природных ресурсов.** Россия — исторически одна из ведущих стран — производителей различных видов минерально-сырьевых ресурсов. Это находит отражение не только в пока-

зателях ресурсного потенциала территории страны и её недр, но и в объёмах добычи и поставок на внутренний и внешний рынок товаров и услуг, получаемых на разных стадиях использования полезных ископаемых.

С течением времени природно-ресурсный потенциал претерпевает значительные трансформации — меняется как перечень видов изучаемых, осваиваемых и используемых природных ресурсов, так и типов природных горно-геологических объектов<sup>1</sup>. В современных условиях наряду с расширением состава добываемых полезных ископа-



КРЮКОВ Валерий Анатольевич — академик РАН, директор ИЭОПП СО РАН.

<sup>1</sup> «Форма хозяйства, по Э. Фридриху, и её большее или меньшее совершенство определяется двумя факторами: 1) природой или средой, то есть суммой препятствий, которые она выдвигает перед человеком, стремящимся удовлетворить свои потребности, 2) преобразующей деятельностью человека» [1, с. 14].

емых возрастает значение ранее использованных ресурсов и объектов, относимых к ресурсам техногенного происхождения. Неправомерно говорить об устойчивой тенденции ухудшения качества и объектов локализации минерально-сырьевых ресурсов. Эта тенденция характерна только для тех периодов, когда наблюдается отставание в формировании новых знаний и навыков работы с меняющейся природной средой, когда консервируются сложившиеся ранее подходы и практики. Противостоять неблагоприятному развитию событий можно за счёт двух основных групп факторов:

а) опережающих научных исследований на всех этапах изучения, освоения и использования природных ресурсов (полезных ископаемых);

б) изменения институциональной среды — норм, правил и процедур взаимодействия всех участников этих процессов.

Ни одна из этих групп факторов не может быть “запущена в работу” без активного участия государства. Важно также иметь в виду, что в подавляющем большинстве стран, за очень редким исключением, государство является собственником и недр, и значительной части природных ресурсов, в них содержащихся.

Ситуация, которую мы наблюдаем в современной России, служит, скорее, красноречивым примером рассогласования и разнонаправленного развития вышеотмеченных факторов, что должно быть предметом всестороннего непредвзятого научного анализа. В этой связи необходимо отметить: в отечественной науке имеет место отставание не столько в изучении фундаментальных свойств природной среды, включая недр и природные ресурсы в целом, сколько в формировании современных и адекватных подходов к освоению и использованию имеющегося потенциала (свидетельством чего служит более чем значительное участие зарубежных компаний, а в настоящее время — их “отечественных” преемников) в выполнении работ высокотехнологичного и научно-исследовательского характера. При этом институциональная среда освоения и использования ресурсов недр и природных ресурсов в целом характеризуется явно неуместной однородностью: преобладанием крупных компаний (холдингов) при отсутствии последовательных и целенаправленных мер со стороны государства по расширению роли и значимости малых и средних инновационных компаний, чаще называемых в горной промышленности “юниорными” (см., например, [2]).

Сложившаяся ситуация во многом стала следствием упрощённого понимания особенностей протекания и развития процессов изучения, освоения и использования как природных ресурсов в целом, так и минерально-сырьевых в частности. Как известно, этим процессам присуща

склонность к монополизации, что связано с ключевой ролью, которую играют в отдельные исторические промежутки крупные и сверхкрупные источники ресурсов. В этом случае в полной мере реализуется так называемый эффект экономии на масштабе — низкие удельные издержки и чрезвычайно высокая рентабельность начальных стадий добычи и освоения. Яркий пример — ПАО «ГМК “Норильский никель”», которому на безальтернативной основе (скорее, по праву преемственности в ходе приватизации) было предоставлено право пользования недрами, содержащими уникальные полиметаллические руды на севере Красноярского края.

Ориентация на доминирующую роль крупных объектов неизбежно ведёт к консервации индустриальной парадигмы освоения и использования природного и ресурсного потенциала страны, а также к значительно меньшей по своей значимости и масштабам реализованной “социальной ценности” — совокупности эффектов в различных секторах отечественной экономики, включая производство горнорудного оборудования.

Так, в 2015–2019 гг. суммарный объём выплаченных дивидендов “Норникеля” составил 903 млрд руб., в то время как капиталовложения — 518 млрд руб. Величина дивидендов была сопоставима с бюджетом Красноярского края, где проживает почти 3 млн человек, площадь которого больше территории многих европейских государств. Величина выплаченных акционерам “Норникеля” дивидендов в 2015, 2017 и 2018 гг. устойчиво превышала величину чистой прибыли [3, 4].

Обстоятельства, отмеченные выше, во многом связаны с природой рыночных отношений: каждый экономический агент преследует свою выгоду в рамках и в границах тех условий, которые определяются нормами, правилами и процедурами (то есть институциональной средой) в определённый период времени. Примером варианта согласования интересов различных участников может быть определение подходов к предоставлению прав пользования участками недр только группам компаний.

Так, в Норвегии в середине 1970-х годов было принято принципиальное решение о предоставлении прав пользования участками недр группам компаний, чаще всего являющихся конкурентами [5]. Следствием этого стало формирование в определённом смысле внутренней конкуренции (вследствие перекрёстного “аудита” решений и предложений) при реализации проектов освоения участков недр. В результате на протяжении длительного времени отмечается устойчивая тенденция снижения относительных (по сравнению с историческим трендом, связанным с увеличе-

нием глубины моря при вовлечении всё новых залежей) удельных издержек (при их общем росте). В то же время реализация подобного подхода не может автоматически обеспечить достижение национальных научно-технологических приоритетов. Эту задачу призвано решать государство, участвуя в определении и регулировании соответствующих процедур, направленных на развитие отечественного научно-технологического потенциала.

В современной экономике в основе регулирования процессов изучения, освоения и использования природных ресурсов, прежде всего минерально-сырьевых, лежит, как правило, целостная система норм, правил и процедур с целью решения широкого комплекса научно-технических и социально-экономических задач. При формировании подобной системы каждая страна проходит свой путь. Его особенности определяются не только природными, но и культурно-историческими условиями (с учётом национальных традиций участия государства в данных процессах), ролью, которую играет минерально-сырьевой сектор в экономике.

Существуют два принципиально различных подхода к формированию подобной системы (автор поддерживает предложенное американским исследователем О. Янгом определение данной системы как “ресурсного режима” [6]):

- доминирование государства в качестве прямого участника на всех стадиях (система централизованного планирования и управления);
- на основе норм, правил и процедур гибкого взаимодействия основных участников — государства, компаний — природо- и недропользователей, а также различных организаций, представляющих интересы региональных, конфессиональных и прочих сообществ граждан страны.

В настоящее время в мире первый подход встречается скорее как исключение, доминирует второй подход. Основное различие между ними обусловлено степенью вовлечённости государства в рассматриваемые процессы. Прямое участие государства, как правило, имеет место в случае его доминирования в собственности активов компаний и хозяйственных структур, вовлечённых в добычу и использование критически важных для экономики страны и её суверенитета полезных ископаемых, а также тех видов природных ресурсов, которые определяющим образом влияют на её социально-экономическое развитие.

К подобным критически важным полезным ископаемым в России относятся углеводороды, редкие и редкоземельные минералы и металлы, а также ураносодержащие руды и минералы. При этом, к сожалению, прямое участие государства в вопросах, связанных с их изучением, освоением и использованием можно охарактеризовать как не-

минальное. Это объясняется тем, что присутствие государства в собственности активов добывающих компаний не подкреплено нормами и правилами, нацеленными на достижение социально-экономической отдачи полезных ископаемых и их источников, которые предоставлены компаниям в пользование, а также соответствующими процедурами государственного регулирования и мониторинга. Увы, преобладание чисто рыночных процедур не обеспечивает движение в социально целесообразном направлении.

**Современный приоритет — социальная ценность природных ресурсов (полезных ископаемых).** Каждая страна, и Россия здесь не исключение, стремится организовать процесс освоения и использования своего природно-ресурсного потенциала таким образом, чтобы обеспечить решение комплекса экономических, внутривластных, технологических, социальных и прочих задач. Ориентация на добычу того или иного вида полезных ископаемых только с целью выпуска определённых видов продукции, пусть и стратегически важных, например, с точки зрения достижения технологического суверенитета, а также получения доходов лишь в виде налоговых поступлений, присуща, скорее, эпохе индустриального развития и не отвечает в полной мере реалиям сегодняшнего дня. Очевидно, что значимость и роль составляющих социальной ценности с течением времени существенно меняются — всё большее внимание акцентируется на вопросах устойчивости функционирования среды обитания человека. Перечень новых ценностных критериев, известный как “Цели устойчивого развития”, составляет основу подхода ООН к определению и выработке путей их достижения [7]. Колоссальная роль в решении этих задач принадлежит регулированию использования природно-ресурсного потенциала.

На пути к достижению социальной ценности изучения, освоения и использования природно-ресурсного потенциала значительно трансформируется содержание понятия “рациональное природо- и недропользование”. Это связано с тем, что помимо полноты извлечения полезных ископаемых из недр, а также соблюдения условий охраны окружающей среды и безопасного ведения работ, не меньшую значимость приобретают вопросы стимулирования инновационных процессов, а также содействия формированию условий и предпосылок устойчивого социально-экономического развития.

Представление о наполнении понятия “социальная ценность” в современных условиях применительно к горнодобывающей промышленности можно получить, анализируя документы стратегического характера, определяющие тенденции развития этой отрасли, а также из отчётов пуб-

личных компаний в таких странах, как Норвегия, Канада, США, Австралия. Например, в “Норвежской технологической стратегии XXI века” отмечается, что “...на континентальном шельфе страны легко извлекаемые ресурсы углеводородов подошли к концу. Оставшиеся ресурсы вызывают необходимость создания и применения новых технологий, а также формирования новых практик достижения *высокой социальной отдачи в процессе их освоения* (курсив — авт.). К числу основных составляющих данных процессов отнесены: 1) создание ценности в процессе добычи, поисков и разведки; 2) обеспечение высокой энергоэффективности и экологичности производства; 3) создание ценности в процессе экспорта создаваемых технологий; 4) создание ценности в процессе подготовки кадров и развития новых компетенций. Развитие технологических компетенций представляется всё более критически важным с точки зрения процесса замещения и последующего развития, например, процессов получения возобновляемой (приливной и ветровой) энергии” [8].

Очевидно, что в ходе формирования социально-ценностного подхода могут быть достигнуты уникальные научные, технологические и профессиональные решения и компетенции [9], имеющие широкую сферу применения с точки зрения других секторов национальной экономики. Значительная часть этих эффектов реализуется не только и не столько в рамках страны в целом, сколько на локальном уровне — в непосредственной близости от мест изучения, освоения и последующего использования природных ресурсов. Данное обстоятельство нашло отражение в отечественной нормотворческой практике: так, в “Концепции технологического развития до 2030 года” (распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г.) отмечается, что особую роль призваны играть сквозные технологии, значимые для многих отраслей экономики, а также запуск промышленных мегапроектов, реализация которых обеспечивает долгосрочный заказ на внедрение критических технологий [10].

На основании изложенного можно расширить ранее введённое нами понятие “общественной ценности недр” [11]. Под ним целесообразно понимать совокупность всех эффектов — экологических, социальных, экономических, технологических (как прямых, так и косвенных), достижение которых обусловлено изучением, освоением и использованием определённых видов природных и минерально-сырьевых ресурсов. Важная особенность такой метрики — её нацеленность на достижение долговременной социально-экономической устойчивости.

Основой систематизации подходов к формированию социально-ориентированной направленности добычи и использования природных

ресурсов может служить современная экономическая теория права [12] (в её рамках лежит и упоминавшаяся оценка “ресурсных режимов”, предложенная О. Янгом). Для России критически важны анализ и оценка возможностей расширения области применения гражданско-правовых (договорных) отношений в данном направлении.

**“Ресурсное проклятие”: виноваты не природные ресурсы, а социальные институты.** Отсутствие целостного подхода к формированию и развитию системы норм, правил и процедур, направленных на обеспечение позитивной динамики социальной ценности природных ресурсов, в том числе недр, неизбежно ведёт к возникновению сложного социально-экономического недуга — “ресурсного проклятия”.

Пожалуй, одна из наиболее цитируемых работ по проблемам формирования социальной ценности — исследование Р. Оти [13]. Он рассматривает вопрос социальной отдачи от природных ресурсов в контексте “ресурсного проклятия” и показывает, что последнее обусловлено не столько процессами изучения, освоения и использования природных ресурсов как таковых, сколько провалами в создании системы норм, правил и процедур, с ними связанных.

При решении этих задач возникает очень важная принципиальная развилка в подходах к формированию и реализации современной социально-экономической политики. Ключевой вопрос: каким образом страна, располагающая значительным природно-ресурсным потенциалом, может достичь уровня современной высокотехнологичной социально-ориентированной экономики и даже его превзойти?

Сторонники первой группы подходов преодоления “ресурсного проклятия” (традиционное направление), скорее, отдадут предпочтение мерам, направленным на процессы изучения, освоения и использования природных ресурсов для преимущественного развития других, как правило, принципиально новых направлений и сфер хозяйственной деятельности. Например, развитие принципиально новых отраслей и производств по выпуску отсутствовавших ранее видов товаров. Суть реализуемого ими подхода будет состоять в решении проблем развития новых направлений и сфер хозяйственной деятельности в рамках политики, осуществляемой преимущественно за счёт природных ресурсов. Такой подход связан с изъятием доходов, прежде всего рентного характера, и перераспределением их в интересах новых секторов экономики и сфер хозяйственной деятельности.

Сторонники второй группы подходов (расширенное понимание) в интересах поступательного социально-экономического развития и последовательной реализации социальной ценности при-

родных ресурсов, вне всякого сомнения, отдадут предпочтение мерам политики, реализуемой “при помощи”. Это будет означать акцент на формирование современного машиностроения, а также наукоёмкого высокотехнологического сервисного сектора и образования, которые не только могут содействовать развитию природно-ресурсного сектора экономики в новом социально-экономически ориентированном качестве, но и будут способствовать становлению широкого спектра производств и сфер деятельности в интересах других секторов экономики и социальной сферы. В этом случае использование рентных доходов имеет изначально целеориентированный характер и направлено на решение научно-технических проблем.

В этой связи применительно к нефтегазовым ресурсам отмечается [14], что в основных мировых центрах добычи углеводородов комплекс условий по использованию регионального научно-технического потенциала входит в число обязательных условий. Эти условия обеспечивают получение значительных выгод теми регионами, на территории которых они реализуются (к их числу относится рост квалификации рабочей силы, развитие смежных и дополняющих производств и сфер экономической деятельности).

В работах чилийских коллег [15] убедительно показано, что процесс освоения минерально-сырьевых ресурсов вовсе не ведёт к “проклятию”, то есть к стагнации, а затем и хроническому отставанию в социально-экономическом развитии. Избежать этого помогает наличие устойчивых институциональных рамок, в том числе “ресурсного режима” и эффективного “процесса обучения” — передачи передовых наукоёмких технологий, знаний и навыков в другие сектора экономики.

При развитии арктических территорий чрезвычайно важно также обеспечение взаимодействия на межрегиональном уровне [16]. Это предполагает отход от старой, узкоориентированной практики, всецело определяемой прошлым развитием и основанной на преимущественном участии только крупных компаний. Применительно к нашей стране эти соображения контрастируют, например, с оценками А. Линча, который утверждал, что “даже если Россия сформирует эффективные и беспристрастные институты для самых различных инвесторов, барьеры в виде чрезвычайно высоких издержек производства при создании инфраструктурных объектов и развитии удалённых регионов Сибири всё равно будут иметь место” [17]. Очевидно, что такой односторонний взгляд во многом основан на сложившихся устаревших индустриальных практиках и далёком от объективного взгляда на развитие экономики нашей страны.

В современной экономике всё большую значимость приобретает подход, в рамках которого значительные усилия всех агентов, вовлечённых в процессы освоения природных ресурсов, направлены на поиск эффективных решений, учитывающих локальные особенности [18] и ориентированных на тренды устойчивого эколого- и социально-экономического развития в долгосрочной перспективе.

**Проекты полного цикла: в основе успешного применения — современная система недропользования.** Формирование и реализация социально-экономической политики “при помощи” встраивания в неё процессов добычи и использования природных ресурсов наиболее результативна при реализации проектов полного цикла, связывающих воедино научную, кадровую, технологическую составляющие на всех этапах создания социальной ценности.

Система централизованного планирования и управления предполагала доминирование так называемого обобщённого подхода. Его суть состояла в решении основных проблем изучения, производства и использования природных ресурсов в рамках экономики в целом на основе крупных межотраслевых проектов и программ. Такой подход имеет право на существование и в современных условиях — в рамках системы индикативного планирования, но уже не как основной, а как дополняющий и ориентированный в большей мере на решение критически важных и суверенно значимых проблем и вопросов. К их числу в настоящее время, безусловно, относится тематика, связанная с освоением и использованием редкоземельных металлов и материалов на их основе.

Осуществление проектов полного цикла предполагает государственное регулирование протяжённых трансрегиональных цепочек реализации социальной ценности [19]. В основе успешности создания и функционирования подобных цепочек лежит эффективная система государственного регулирования. Применительно к полезным ископаемым основными её составляющими являются:

а) принципы доступа к участкам недр (во всём мире доступ на основе аукционного принципа “кто больше заплатит” — скорее исключение, нежели правило; при этом практикуются формы соучастия нескольких недропользователей, равно как и определение целесообразных границ участка недр исходя из отмеченных выше ценностных критериев, а не только геологических границ);

б) комплекс научно-технических условий изучения и освоения участков недр (сюда входят условия достижения научно-технического уровня и динамика в течение рассматриваемого периода времени);

в) наличие комплексных (межотраслевых) органов государственного регулирования, как правило, имеющих полномочные офисы в местах изучения и освоения участков недр, содержащих определённые полезные ископаемые.

Не менее важно и то, что подход к формированию и осуществлению подобных проектов полного цикла предполагает необходимость участия в их обсуждении и последующем мониторинге реализации трёх сторон (государства, бизнеса, общества).

Крупные компании должны играть роль системных интеграторов, внедрять передовые технологии, знания и опыт их применения. Как правило, это участие в наиболее капиталоемкой и технологически апробированной части проекта. В то же время наукоёмкие производственно-сервисные компании выполняют роль инициаторов создания и применения современных прикладных знаний и технологий, учитывающих особенности конкретных природных и минерально-сырьевых ресурсов и объектов их локализации.

Роль государства — формирование и поддержание условий развития адекватной организационно-экономической среды, способствующей синергетическим эффектам; определение и продвижение приоритетов научно-технической политики на всех стадиях процесса изучения, освоения и использования природных ресурсов [20].

Ключевая роль в закреплении и продвижении отмеченных выше принципов и подходов, особенно в случае критически важных полезных ископаемых, принадлежит природному, ресурсному и прежде всего горному законодательству [21]. Среди первоочередных направлений его развития, точнее, приведения в соответствие с социально-ценностными критериями, следует отметить необходимость:

- расширения рамок и границ применения гражданско-правовых отношений в природо- и недропользовании;

- создания в макрорегионах страны правомочных и полномочных межотраслевых представительств федеральных органов власти, осуществляющих процесс предоставления и мониторинга прав пользования природными ресурсами; создания сети центров хранения и доступа к данным, включая информацию о проведённом ранее поиске и разведке минерально-сырьевых ресурсов (на протяжении XX в. был накоплен колоссальный объём данных, они нуждаются в современном переформатировании и обеспечении к ним доступа);

- формирования системы становления и развития венчурных и юниорных компаний, осуществляющих поиск, разведку, освоение и разработку природных объектов на условиях риска;

- содействия формированию внутреннего спроса на минерально-сырьевые ресурсы, что особенно важно в случае критических видов полезных ископаемых; создания консорциумов (стимулирование) и объединений компаний, реализующих проекты полного цикла в сфере изучения, освоения и использования природных ресурсов.

Нельзя не отметить, что целевые установки формирования и развития горного права в России предвосхитили современный подход на основе проектов полного цикла. Как отмечалось в классической работе А. Штофа [22], Россия в интересах будущих поколений для бережливого обращения с месторождениями исторически, со времён Петра I, изначально следовала широкому подходу. В Западной Европе достижение бережливости ограничивалось только собственно добывающей промышленностью — поиском, освоением и разработкой источников полезных ископаемых. В России же основным предметом регламентации горных законов служили и “горные промыслы”, и “горные заводы” [23]. Тем самым отчётливо выражалось стремление государства к взаимосвязанному развитию как горнодобывающей, так и обрабатывающей промышленности в рамках, близких по своему наполнению к проектам полного цикла [21].

Специфика формирования и реализации подходов на основе расширенного понимания, предполагающих встраивание процессов освоения природно-ресурсного потенциала в решение экологических и социально-экономических проблем (включая упоминаемые в документе ООН “Цели устойчивого развития”), невозможна вне детальной и скрупулёзной их настройки в рамках отдельных проектов<sup>2</sup>. Это обстоятельство, в свою очередь, невозможно вне учёта особенностей социально-экономического развития конкретной территории реализации проекта. Среди проблем нельзя не отметить то, что предлагаемые в настоящее время подходы к соучастию в проектах нескольких компаний не имеют сколь-нибудь развитой системы согласования интересов разных сторон (Федерации, недропользователей, регионов, общественных объединений). Примером служит безуспешная попытка реализовать проект на основе совместного участия компаний ПАО

<sup>2</sup> Весьма любопытна оценка неприменимости узкого бюджетно-фискального подхода к рассмотрению проблем развития горной промышленности, относящаяся к XIX веку: “У нас смотрели на золотопромышленность как на источник доходов для казны, а не как на дело государственное, производящее увеличение банковского золотого резерва, то есть как на дело в высшей степени полезное для наших финансовых операций и притом производимое большею частью людьми, сосланными из России в Сибирь — без отвлечения рабочей силы страны от других промыслов, увеличивающих государственное богатство” [24, с. 2].

“Норильский никель” и ОАО “Русская платина” по освоению и разработке залежей платиновых [25].

В настоящее время активно развивается и уточняется подход к реализации проектов на основе соглашений о поощрении и защите капиталовложений [26], который отличает финансово-инвестиционная направленность. Одновременно разрабатываются правила для крупного бизнеса по взаимодействию с малыми и средними предприятиями [27]. При этом отмечается, что правила будут иметь лишь рекомендательный характер.

Как показывает исторический опыт России, чтобы учесть многоаспектный и комплексный характер проектов полного цикла в сфере природо- и недропользования, необходимо не только двигаться по пути развития договорных отношений всех заинтересованных сторон в направлении приближения к провозглашённым в упоминавшемся документе ООН ориентирам, но и создавать разветвлённую систему органов государственного регулирования. Одним из вариантов может быть воссоздание (разумеется, на новом качественном уровне) “горных округов” с присущей им системой региональных представительств федеральных органов власти на местах.

**Роль и место научно-экспертного сообщества не могут не быть значимыми.** Каждая страна по-своему проходит путь реализации той значительной потенциальной социальной ценности, которой априори обладают природные ресурсы. Россия в настоящее время стремится привнести элементы гибкости в административно-правовые процедуры недропользования. Вопросам расширения сферы действия собственно договорных отношений при этом уделяется значительно меньше внимания.

Нельзя не учитывать те организационно-структурные рамки и условия, в которых функционирует российская экономика. Ещё в 2021 г. отмечалось: “Фактически в настоящее время промышленность развивается в рамках двухполюсной модели, при которой в одних отраслях промышленности доминируют крупные, масштабные производства, а в других развитие идёт вокруг предприятий с небольшими объёмами производства, ориентированных на региональные рынки сбыта, при этом средний класс промышленности, массовые, но конкурентоспособные производства, способные конкурировать на российском рынке наравне с импортёрами, в большинстве отраслей отсутствуют” [28].

Двухполюсная модель по-разному проявляет себя в разных регионах страны. Например, в экономике Сибири и прежде всего Красноярского края отмечается высокая степень неравномерности распределения промышленного потенциала в пользу крупных производств. Их отличительная

особенность состоит в сосредоточении, как правило, начальных переделов производственно-технологической цепочки, а создание продукции и научно-производственных услуг с более высокой добавленной стоимостью происходит в других регионах, в то время как центры получения прибыли могут находиться не только за пределами региона, но даже российской юрисдикции. Это означает, что крупные компании определяют в значительной степени структуру и динамику экономики в регионах, хозяйство которых основано на добыче природных ресурсов. При этом доминирующие формы государственной поддержки в значительной мере направлены на поощрение только традиционной деятельности горнодобывающих компаний — освоение и добычу минерально-сырьевых ресурсов. При реализации подобных, в целом узконаправленных, мер поддержки в качестве основных аргументов высказываются следующие:

а) отсутствие отечественного производства необходимых производственно-технических продуктов и услуг;

б) недостаточно ёмкий внутренний спрос на определённые виды продукции более глубокой переработки.

Эти причины имеют, как правило, не постоянный характер и вполне могут изменяться вследствие стимулирующих мер и целенаправленных шагов со стороны государства — собственника недр и значительной части природных ресурсов — по развитию необходимых производств как на входе в проект, так и на выходе из него.

Важным условием при выработке принципиально новых высококонкурентных решений и подходов служат учёт локальных условий, которые определяют особенности осваиваемых источников природных ресурсов и реализуемых проектов, а также возможностями, которыми располагает та или иная территория. В настоящее время мы имеем дело с необходимостью решения чрезвычайно непростой и в то же время важной управленческой задачи: как наилучшим образом соединить отмеченные выше особенности реализации определённого проекта с тем, чтобы компаниям-инвесторам было выгодно в них участвовать не только в рамках освоения и добычи природных ресурсов. Это также означает создание условий для получения государством (на федеральном, региональном и муниципальном уровнях) определённого социально-значимого результата, включая решение научно-технических проблем.

Чрезвычайно велика роль формируемого вокруг крупных проектов окружения из числа малых и средних инновационных компаний (“юниорных” компаний, сочетания которых, как правило, поспешно именуются “кластерами”).

Ключевая проблема — не столько их вовлечение в орбиту крупных проектов, сколько создание устойчивых и эффективных форм взаимодействия. Только при наличии подобных форм и их жизнеспособности можно говорить о “кластерах” в их современном общепринятом понимании.

Как же обеспечить долгосрочный характер подобного взаимодействия? Как поддерживать и ориентировать его развитие в направлении, отвечающем потребностям развития отечественной науки и техники? Особая роль в движении ситуации в социально-значимом направлении принадлежит научно-экспертному сообществу. Государственная система регулирования процессов природо- и недропользования включает в себя не только соответствующую систему норм, правил и процедур, задающих коридор допустимых решений на всех этапах изучения, освоения и использования природных ресурсов, но и предполагает наличие системы органов государственного регулирования в ходе их практической реализации.

Важнейшей составляющей системы органов государственного управления является наличие в её составе экспертно-аналитической составляющей. Роль её заключается не только в определении целесообразности предлагаемых компаниями решений и подходов к реализации задуманного, но и в оказании содействия в определении направлений развития в будущем. Нельзя неправомерно определять и задавать жёсткие требования и нормативы по уровню, например, локализации технологических решений при отсутствии условий и предпосылок для их достижения<sup>3</sup>. Предпочтительна реализация требуемого уровня локализации технологической составляющей в течение определённого промежутка времени.

С учётом отмеченного выше роль научно-экспертного сообщества, в рамках которого Российская академия наук, несомненно, призвана играть ведущую роль, состоит в следующем:

- участия как в обсуждении, так и в процессе мониторинга реализации проектов;
- учёте роли и значения знаний и навыков, имеющих локальный, специализированный характер;
- содействии становлению и развитию современной организационно-экономической модели реализации проектов на основе кооперации, ин-

теграции, сотрудничества и партнёрства (в отличие от сохраняющейся унитарной модели);

- ориентации не только и не столько на показатели финансовой доходности и выплаты дивидендов, сколько на социальную ценность проектов полного цикла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Крубер А.* Хозяйство, как эксплуатация естественных богатств (Антропогеографический этюд). Москва: Типография Вильде, 1917.
2. Geological Survey of Canada. Strategic Plan 2018–2023. Natural Resources of Canada, 2018. <https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/earth-sciences/pdf/GSC-Strategic-Plan-2018-2023.pdf> (дата обращения 15.05.2023).
3. *Катасонов В.* Экономическое развитие России блокируется олигархами — нужна национализация // *Завтра*. 2023. 5 февраля. [https://zavtra.ru/blogs/ekonomicheskoe\\_razvitiye\\_rossii\\_blokiruetsya\\_oligarhami\\_-\\_nuzhna\\_natsionalizatsiya?ysclid=li7hye45qx131476603](https://zavtra.ru/blogs/ekonomicheskoe_razvitiye_rossii_blokiruetsya_oligarhami_-_nuzhna_natsionalizatsiya?ysclid=li7hye45qx131476603) (дата обращения 15.05.2023).
4. *Крюков В.А., Нефёдкин В.И.* Ключевые игроки в Арктике — от социалистических комбинатов к компаниям-лидерам устойчивого развития // *Научные труды Вольного экономического общества России*. М., 2021. Т. 228. С. 126–154. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2021-228-2-126-153>
5. *Al Kasim F.* Managing Petroleum Resources. The “Norwegian Model” in a Broad Perspective. Oxford Institute for Energy Studies. OIES 30, 2006.
6. *Young O.R.* Resources regimes. Natural resources and social institutions. Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press, 1982.
7. What are the Sustainable Development Goals? United Nations Development Programme, 2019. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (дата обращения 17.05.2023).
8. OG21 — Oil and Gas in the 21st Century. Norway's Technology Strategy for the 21st Century. Strategy Document. Oslo: Ministry Petroleum and Energy, 2001. [https://www.sintef.no/globalassets/project/trondheim\\_gts/documents/og21.pdf/](https://www.sintef.no/globalassets/project/trondheim_gts/documents/og21.pdf/) (дата обращения 16.05.2023).
9. *Szulecki K., Chitra A., Claes D.H. et al.* Building Bridges Towards a Carbon Neutral Future Climate Strategies. Stockholm Environment Institute, 2021. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28067.37922>
10. Правительство утвердило Концепцию технологического развития до 2030 года / Распоряжение от 20 мая 2023 года № 1315-р. <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения 16.06.2023).
11. *Крюков В.А., Токарев А.Н.* Нефтегазовые ресурсы в трансформируемой экономике: о соотношении реализованной и потенциальной общественной ценности недр (теория, практика, анализ и оценки). Гл. 2. Новосибирск: Наука-Центр, 2007. С. 82–156.
12. *Познер Р.А.* Экономический анализ права: В 2-х т. / Пер. с англ. Под ред. В.Л. Тамбовцева. СПб.: Экономическая школа, 2004.

<sup>3</sup> В определённом смысле поучителен опыт соглашений о разделе продукции в середине 1990-х годов — по реализации нефтегазовых проектов на острове Сахалин. В частности, в документ было внесено требование, согласованное и государством, и недропользователями, о 70%-м уровне локализации производства оборудования при реализации проекта. Увы, со стороны государства так и не был сформирован подход к мониторингу хода реализации этого важного требования [29].

13. *Auty R.M., Furlonge H.I.* The Rent Curse: Natural Resources, Policy Choice, and Economic Development. Oxford: Oxford University Press, 2019.
14. *Israel L.* Local content strategies must evolve to support sustainability. [https://www.offshore-mag.com/business-briefs/article/14204306/commentary-local-content-strategies-must-evolve-to-support-sustainability?utm\\_source=OFF+Daily&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CPS210604067&o\\_eid=3445H6683990G1B&rdx.ident%5Bpull%5D=ome-da%7C3445H6683990G1B&oly\\_enc\\_id=3445H6683990G1B](https://www.offshore-mag.com/business-briefs/article/14204306/commentary-local-content-strategies-must-evolve-to-support-sustainability?utm_source=OFF+Daily&utm_medium=email&utm_campaign=CPS210604067&o_eid=3445H6683990G1B&rdx.ident%5Bpull%5D=ome-da%7C3445H6683990G1B&oly_enc_id=3445H6683990G1B) (дата обращения 15.05.2023).
15. *Castaño A.M., Lufin M., Atienza M.* A Structural Path Analysis of the Chilean mining industry between 1995–2011. What are the channels through which extractive activity affects the economy? // Preprint. Resources Policy, Elsevier, 2019. V. 60 (C). P. 106–117.
16. *Murtagh A., Collins P.* Northern Peripheries & Creative Capital: The Nature of Creative Capital & Its Role in Contributing to Regional Development in Nordic Regions. Arctic Yearbook 2017. [https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2017/Scholarly\\_Papers/4\\_Northern\\_Peripheries\\_&\\_Creative\\_Capital.pdf](https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2017/Scholarly_Papers/4_Northern_Peripheries_&_Creative_Capital.pdf) (дата обращения 18.05.2023).
17. *Lynch A.C.* Roots of Russia's Economic Dilemmas: Liberal Economics and Illiberal Geography // Europe-Asia Studies. 2002. V. 54. № 1. P. 31–49. <https://doi.org/10.1080/09668130120098223>
18. *Kurrika H., Grillitsch M.* Resilience in the periphery: What an agency perspective can bring to the table WP 2020/07. Centre for Innovation, Research and Competence in the Learning Economy (CIRCLE) Lund University. [http://wp.circle.lu.se/upload/CIRCLE/workingpapers/202007\\_kurikka.pdf](http://wp.circle.lu.se/upload/CIRCLE/workingpapers/202007_kurikka.pdf) (дата обращения 18.05.2023).
19. *Усс А.В., Крюков В.А., Нефёдкин В.И., Криворотов А.К.* Как повысить региональные эффекты от ресурсных проектов // ЭКО. 2022. № 2. С. 27–46.
20. *Литвиненко В.С., Петров В.И., Василевская Д.И. и др.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / Записки горного института. Т. 259. СПб.: Горный университет, 2022. С. 95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
21. *Крюков В.А.* О направлениях развития горного законодательства и горного управления в России // Предпринимательское право. 2022. № 2. С. 3–12.
22. *Штоф А.* Горное право. Сравнительное изложение горных законов, действующих в России и главнейших горнопромышленных государствах Западной Европы. СПб.: Тип. М.М. Стасюлевича, 1896.
23. *Струкгов В.Г.* Курс Горного Права. Изложение основных начал горного законодательства России в связи с кратким обзором принципов горных законодательств важнейших горнопромышленных государств Западной Европы. СПб.: Тип. И.Н. Скороходова, 1907.
24. *Латкин В.Н.* О золотопромышленности в Сибири. СПб., 1864.
25. *Зайнуллин Е.* Мы все взрослые люди. Вице-президент “Русала” Елена Безденежных об отсутствии дивидендов “Норникеля” // Коммерсантъ. 2023. 1 июня. <https://www.kommersant.ru/doc/6014670?ysclid=lid1avddw2484576826> (дата обращения 07.05.2023).
26. *Бойко А., Андреева О.* Соглашения о защите и поощрении капиталовложений временно не заключаются // Ведомости. 2020. 29 августа. [https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2021/08/29/884216-soglasheniya-zaschite?utm\\_campaign=newspaper\\_30\\_8\\_2021&utm\\_medium=email&utm\\_medium=email&utm\\_source=vedomosti%3Futm\\_campaign%3Dnewspaper\\_30\\_8\\_2021&utm\\_source=vedomosti](https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2021/08/29/884216-soglasheniya-zaschite?utm_campaign=newspaper_30_8_2021&utm_medium=email&utm_medium=email&utm_source=vedomosti%3Futm_campaign%3Dnewspaper_30_8_2021&utm_source=vedomosti) (дата обращения 18.05.2023).
27. *Виноградова Е.* Дочерние новости: Минэк подготовил крупному бизнесу кодекс работы с малым // Известия. 2021. 20 декабря. <https://iz.ru/1265823/ekaterina-vinogradova/dochernie-novosti-minek-podgotovil-kрупному-biznesu-kodeks-raboty-s-malym> (дата обращения 07.05.2023).
28. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации “Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности”. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.11.2021 г. № 1933. <http://government.ru/docs/all/137531/> (дата обращения 04.06. 2023).
29. *Михайлов А., Субботин М.* “Яблоко” и законодательство о соглашениях о разделе продукции (СРП). М.: Интеграл-Информ, 2003.

## РОЛЬ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОГНОЗЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ. ОТ МОДЕЛЕЙ К ОБЪЕКТАМ

© 2023 г. Н. А. Горячев<sup>a,b,\*</sup>, В. Ю. Фридовский<sup>c,\*\*</sup>, А. Е. Будяк<sup>b,\*\*\*</sup>, И. Н. Горячев<sup>d,\*\*\*\*</sup>,  
С. В. Ефремов<sup>b,\*\*\*\*\*</sup>, М. В. Кудрин<sup>c,\*\*\*\*\*</sup>, Ю. И. Тарасова<sup>b,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия

<sup>b</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>c</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

<sup>d</sup>Сибирская школа геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, Россия

\*E-mail: goryachev@neisri.ru

\*\*E-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

\*\*\*E-mail: budyak@igc.irk.ru

\*\*\*\*E-mail: ivan.goryachev@geo.istu.edu

\*\*\*\*\*E-mail: esv@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: kudrinmv@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: j.tarasova84@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.05.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 11.06.2023 г.

В статье показаны возможности академической фундаментальной металлогенической науки в прогнозе и поиске разнотипных рудных месторождений на примере работ различных академических институтов в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах. С применением комплекса минералого-геохимических и геолого-структурных методов исследованы перспективы на медь и золото Верхне-Индиго-Иркутского и Колымского регионов и конкретных площадей в Забайкалье и Бодайбинском районе Иркутской области. Рассмотрены проблемные вопросы оценки и развития минерально-сырьевой базы регионов.

**Ключевые слова:** минералого-геохимические методы, фундаментальная металлогения, прогноз и оценка минерально-сырьевых ресурсов регионов Сибири и Дальнего Востока РФ.

**DOI:** 10.31857/S0869587323070034, **EDN:** ZUFMWO

Сегодня металлогенические исследования — это прежде всего *прогнозно-минералогические работы*, в которых заметная роль принадлежит ака-

демической геологии. В становление и развитие металлогении как важной отрасли науки о происхождении и закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых огромную роль сыграли учёные Российской академии наук, начиная с Ю.А. Билибина, заложившего её основы, и кончая недавно ушедшим от нас академиком Д.В. Рундквистом. Здесь уместно вспомнить про выдающийся прогноз Ю.А. Билибина по золоту Колымы (по разным источникам, от 500 до 2500 т золота), который не только подтвердился, но и заметно превышен: 3500 т золота, преимущественно россыпного, уже добыто. Билибинский прогноз известен всем геологам, занимающимся рудными месторождениями, в мире.

ГОРЯЧЕВ Николай Анатольевич — академик РАН, главный научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН, главный научный сотрудник ИГХ СО РАН. ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич — член-корреспондент РАН, директор ИГАБМ СО РАН. БУДЯК Александр Евгеньевич — кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке ИГХ СО РАН. ГОРЯЧЕВ Иван Николаевич — научный сотрудник Сибирской школы ИРНТУ. КУДРИН Максим Васильевич — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник ИГАБМ СО РАН. ТАРАСОВА Юлия Игоревна — кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией геохимии рудообразующих систем ИГХ СО РАН.

О металлогении как науке написано много, но в современных условиях перед нами стоит сложная задача — решать вопросы, связанные с восполнением минерально-сырьевой базы, особенно по стратегическим видам минерального сырья, среди которых следует выделить металлы и металлоиды: уран, марганец, хром, титан, бокситы, медь, свинец, сурьма, олово, цинк, никель, молибден, вольфрам, кобальт, литий, рубидий, цезий, бериллий, скандий, редкоземельные элементы, индий, галлий, германий, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, рений, золото, серебро, платиноиды. Мы остановимся именно на *прогностической роли* металлогенической науки, основанной в значительной степени на модельных построениях, которые впитали в себя весь спектр знаний об условиях появления и локализации разнотипных месторождений твёрдых полезных ископаемых, прежде всего меди и золота.

В работах, направленных на решение этой задачи, в последнее время возникла тревожная тенденция, подмеченная специалистами Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов Министерства природных ресурсов и экологии РФ (ЦНИГРИ МПР РФ), а именно: снижается роль металлогенического анализа территорий и растёт роль геометрии при планировании геологоразведочных работ (из доклада гендиректора института А.И. Черных на конференции в Якутске 21.03.2023). В материалах по обоснованию поисковых работ всё чаще нет ответов на вопросы: какой тип оруденения прогнозируется? Каковы объекты-аналоги? Какова прогностно-поисковая модель поискового объекта? Какова модельная и фактическая структура прогнозируемого рудного поля? Каков предполагаемый вещественный состав руд и рудовмещающих пород? Какой прогностно-поисковый комплекс в зависимости от типа объекта и поисковой обстановки наиболее эффективен? Чем контролируется оруденение и куда оно может продолжаться? Каковы предполагаемые закономерности локализации прогнозируемых минерализованных зон? То есть геологические предпосылки перспективности объекта присутствуют всё в меньшем объёме. Именно поэтому возникает потребность в применении прогностно-металлогенических разработок институтов, действующих под научно-методическим руководством РАН. Обычно геологи-производственники ожидают от академических институтов результатов исследований по фундаментальным основам металлогении и генетическим моделям формирования месторождений. Однако, по нашему мнению, институты РАН могут дать больше, что будет проиллюстрировано на ряде конкретных примеров.

Металлогения нацелена прежде всего на прогноз, и поэтому её нередко считают прикладной

наукой. Однако без использования *геолого-генетических моделей* формирования разнотипного оруденения никакой прогноз невозможен. А металлогенические модели строятся на основе сложного комплекса факторов, включая влияние вмещающих осадочных комплексов, через процессы метаморфизма к рудогенной роли магматических процессов. Таким образом, в моделях учитывается фундаментальный вклад всех геологических наук, в том числе и геофизические данные.

Металлогенические модели следует разделять на *глобальные* (металлогенические особенности планетарных структур, например Тихоокеанского рудного пояса), *региональные* (металлогения складчатых поясов и внутрикратонных ареалов, например Верхояно-Колымского и Монголо-Охотского орогенных поясов) и *локальные* (рудно-магматические системы как аспект прогноза, например в случае медно-порфировых систем, или модель сухоложского типа и пр.). Общие модели представляют собой геодинамический аспект металлогении, характеристику металлогении геодинамических обстановок [1]. Локальные модели — это специфика рудно-магматических систем разного уровня (например, порфировых систем) [2] или гидротермально-метаморфогенные модели (сухоложский тип) [3, 4].

**Примеры локального прогноза по работам институтов, действующих под эгидой РАН.** Одним из примеров влияния глобальных металлогенических моделей на проведение прогностно-поисковых работ можно считать Тихоокеанский рудный пояс, охарактеризованный как планетарная структура ещё в работах [5, 6]. Модель распределения медных ресурсов в пределах этого пояса показана Р. Силлитоу [7], который отметил существование некоей лакуны на территории Востока России. Это побудило к проведению геологических изысканий, приведших к открытию ряда медно-порфировых объектов (Лора, Песчанка, Малмыж), и специальных исследований, которые провели сотрудники СВКНИИ ДВО РАН в Приохотской части Магаданского региона [8]. Эти исследования показали наличие ряда предпосылок для возможных находок промышленной минерализации в дополнение к уже известному месторождению Лора, что заметно повышает перспективы данного района.

Вопросы глобального прогноза с переходом на региональный уровень наиболее полно затронуты в исследованиях сотрудников ИГЕМ РАН, прежде всего группы во главе с членом-корреспондентом РАН А.В. Волковым. Ими на примере ряда региональных и общероссийских баз металлогенических данных на основе концепции рудообразующих систем, предложенной в 1968 г. Д.В. Рундквистом [9], разработан комплекс прогностных карт с учётом данных ГИС-анализа с выявлением крупных рудных районов, потенциально

перспективных с точки зрения обнаружения богатых месторождений металлов разных типов [10–12].

Применение IT-технологий для региональных прогнозных работ можно проиллюстрировать исследованиями Сибирского института геологических наук Иркутского национального исследовательского технического университета [13]. Такого рода исследования проводятся и геологами ЦНИГРИ МПР РФ [14].

**Прогноз перспективных участков на золото на основе IT-технологий на примере Иньяли-Дебинского синклинория Яно-Колымского орогенного пояса.** Данная работа основана на компьютерном анализе большого массива накопленных данных, обработанных по определённой схеме [13], изложенной ниже. Сама процедура исследования заключалась в последовательных (пошаговых) операциях.

Шаг первый — выбор исходных данных: геологическое строение, включая стратиграфические горизонты, складки, зоны разломов, ареалы интрузивных пород, результаты поисковых и региональных геофизических работ, материалы прикладной геохимии, спутниковые данные, расположение известных месторождений.

Шаг второй — выбор определяющих признаков. Из всех исходных данных извлекаются разнообразные признаки, которые, по мнению исследователя, могут играть роль в прогнозе нахождения месторождения. Все признаки — численные значения в точке пространства. Примерами таких признаков являются плотность даек на площади (по данным геологического строения), расстояние до интрузивов (по данным геологического строения), данные горизонтального градиента поля силы тяжести (по данным геофизики), локальная компонента магнитного поля (по данным геофизики), индекс вторичных изменений (по спутниковым данным) и многие другие.

Шаг третий — подготовка данных: 1) признаки пересчитываются на регулярную сеть (размер ячейки сети зависит от масштаба данных) и нормируются; 2) месторождения случайным образом делятся на обучающую и тестовую выборки в пропорции 75/25; 3) для каждого из месторождений в обеих выборках определяется набор значений признаков из ячеек регулярной сети.

Шаг четвёртый — обучение модели. Выбирается один или несколько методов машинного обучения. Наиболее часто используются методы случайного леса, опорных векторов, нейросети различной архитектуры. Алгоритм тренируется с использованием признаков, содержащихся в обучающей выборке месторождений, а затем проверяется на тестовой выборке. В результате различными методами оценивается точность прогноза с использованием данного алгоритма и обосновывается вероятность того, что объект, характеризующийся данным набором признаков, является месторождением. Оценка точности прогноза поз-

воляет определить процент правильных и неправильных предсказаний. Если точность прогноза не удовлетворительна, пересматривается набор признаков, изменяются параметры алгоритма или выбирается более подходящий алгоритм.

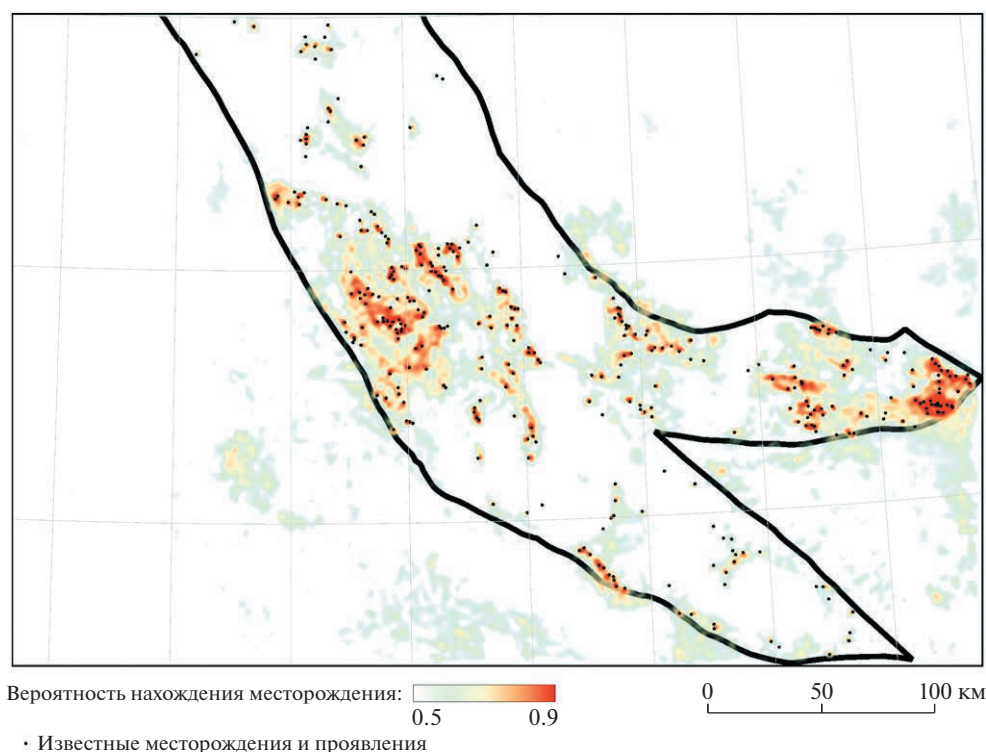
Шаг пятый — построение прогноза. Если точность прогноза удовлетворяет, на всю площадь строится карта прогноза, на которой для каждой ячейки регулярной сети рассчитывается вероятность нахождения месторождения (рис. 1).

Другой пример региональных работ прогноз-но-металлогенического характера — исследование геологов Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН под руководством члена-корреспондента РАН В.Ю. Фридовского, осуществивших прогноз на основании тонких исследований минералогии и геохимии руд с учётом созданной прогноз-поисковой модели орогенных месторождений золота западной и центральной частей Яно-Колымского пояса.

**Типоморфизм сульфидов и геолого-генетическая модель для прогноза крупнообъёмных месторождений золота орогенного типа западного и центрального секторов Яно-Колымского металлогенического пояса.** Большинство (45%) золоторудных месторождений мира с запасами более 30 т золота относятся к орогенному типу (ОЗМ); это намного больше, чем в других типах месторождений [15, 16]. Золото в ОЗМ находится в самородной “видимой” форме в кварцевых жилах/прожилках минерализованных зон дробления. В крупнообъёмных месторождениях этого типа во вкрапленном пирите и арсенопирите присутствует “невидимое” золото — твёрдый раствор  $\text{Au}^+$  или наночастицы  $\text{Au}^0$ . Вкрапленные руды обычно бедные и что называется дважды упорные<sup>1</sup>. Появление технологий переработки таких руд высокотемпературным автоклавным окислением и интенсивным цианированием стимулировало их изучение и поиски.

Наблюдения микротекстур с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были дополнены анализом основных и второстепенных элементов в главных рудообразующих сульфидах (рентгеноспектральный микроанализ — РСМА) и данными изотопного состава серы  $\text{S}^{34}$  вкрапленных пирита и арсенопирита ряда ОЗМ западного и центрального секторов Яно-Колымского металлогенического пояса (ЯКМП) [17–19]. Результаты использовались для реконструкции развития рудообразующих событий и переинтерпретации источника золота и гидротермальных флюидных потоков золотых систем, а также определения региональных и локальных призна-

<sup>1</sup> Первичные руды золота называют упорными, если извлечение из них золота с использованием традиционной технологии цианирования не превышает 80%. Упорность золота чаще всего связана с рассеянием его в сульфидных минералах и арсенопирите в изоморфной или дисперсной форме, затрудняющей доступ выщелачивающего раствора.



**Рис. 1.** Прогнозная карта перспективных участков на восточную (хатангскую) часть Яно-Хатангского орогенного пояса [13]

ков (основа прогнозно-поисковой модели) ОЗМ ЯКМП, изложенных ниже.

*Региональные признаки ОЗМ* определяются прежде всего особенностями позднеюрско-раннемелового геологического развития и металлогении Яно-Хатангского орогенного пояса.

1. Связь ОЗМ с позднеорогенными событиями на восточной континентальной окраине Сибирского кратона. Положение ОЗМ в тылу сопряжённых позднеюрских Уяндино-Ясачненского вулканического и Главного батолитового поясов.

2. Приуроченность к зонам трансформных продольных разломов — Адыча-Тарынского, Чай-Юрьинского и др., являющихся путями транзита региональных флюидных потоков и магмаконтролирующими структурами.

3. Умеренное развитие в рудных районах магматических образований комплекса малых интрузий, остывание которых субсинхронно эпизодам тектоно-термальных событий формирования орогенного оруденения.

4. Проявление признаков корово-мантийного взаимодействия при эволюции рудообразующих систем.

6. Постметаформическая природа позднеорогенных золоторудных месторождений.

*Локальные признаки* определяются средой рудоотложения, параметрами и эволюцией рудообразующих систем.

1. Сочетание систем региональных продольных разломов и разломов 2–3 порядков с поперечными зонами повышенной проницаемости, выраженных сгущением тектонической трещиноватости, локальными разломами и роями даек комплекса малых интрузий.

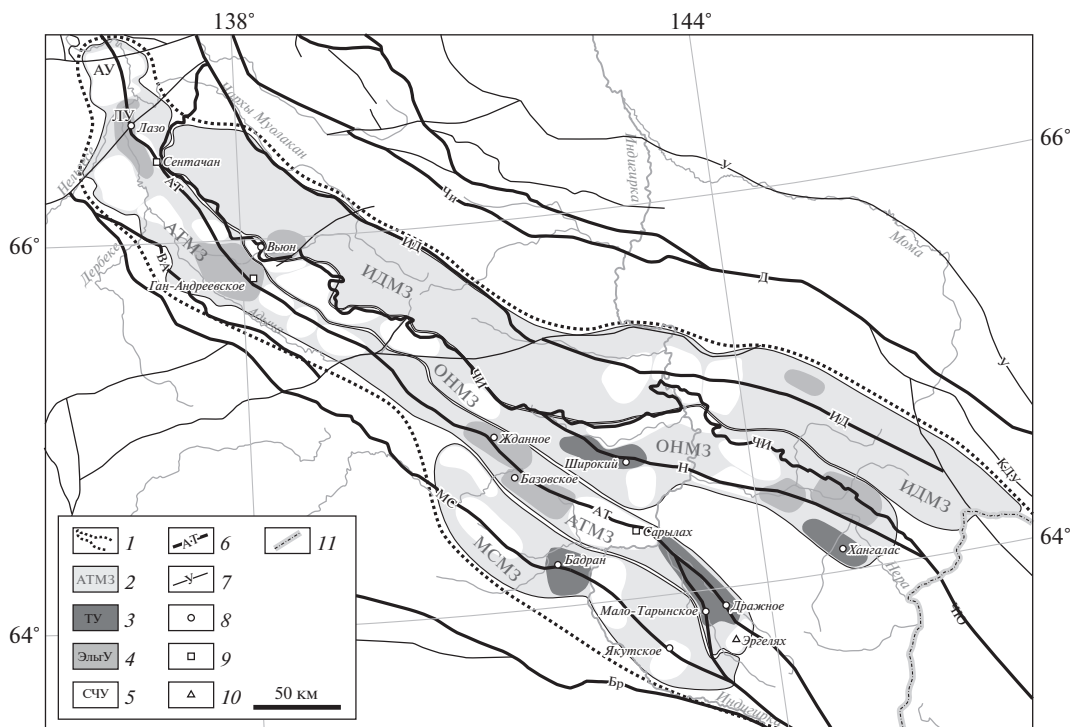
2. Длительное многоэтапное развитие рудолокализирующих структур; характерны структуры прогрессивных деформаций.

3. Компрессионный режим рудного этапа и локальное проявление транспрессионного режима, благоприятные для вскрытия нижнекорковых флюидных систем.

4. Значительный вертикальный и латеральный (до 5–6 км) размах оруденения с редуцированными или отсутствующими минералого-геохимической и изотопно-геохимической зональностью.

5. Развитие широких (до первых сотен метров) зон кварц-серцит-карбонатных метасоматитов с импрегнированными пиритом и арсенопиритом, пространственно связанных с разломами, обычно с системами межпластовых и лестничных жил, а также штокерков.

6. Повышенная (до первых сотен г/т) золотосодержательность вкрапленных пирита и арсенопирита из метасоматитов при общей сульфидизации до 5–8%. Преобладающей формой золота в сульфидах является “невидимая” структурно-связанная  $Au^+$ .



**Рис. 2.** Перспективные площади на обнаружение крупнообъёмных золоторудных месторождений оротенного типа в центральном и западном секторах Яно-Колымского металлогенического пояса (с использованием данных [20–23]): 1 – граница Яно-Колымского металлогенического пояса; 2 – металлогенические зоны и их названия; 3–5 – рудные узлы: 3 – перспективные первой очереди, 4 – перспективные второй очереди; 5 – прочие; 6–7 – разломы и их названия: 6 – главные, 7 – прочие; 8–10 – месторождения: 8 – оротенные золоторудные, 9 – золото-сурьмяные, 10 – золото-висмутовые (связанные с интрузивами); 11 – граница Республики Саха (Якутия).

Инъяли-Дебинская металлогеническая зона (ИДМЗ), Адыча-Тарынская металлогеническая зона (АТМЗ), Мугурдах-Селириканская металлогеническая зона (МСМЗ).

Разрывные нарушения: Бр – Брюнгадинский, МС – Мугурдах-Селириканский, АТ – Адыча-Тарынский, Н – Нерский, ЧИ – Чаркы-Индибирский, ЧЮ – Чай-Юрьинский, ИД – Инъяли-Дебинский, Чи – Чибгалахский, Д – Дарпирский, У – Улаханский, КДУ – Кунтук-Дебинско-Умарский

7. Золотосодержащие вкрапленные арсенопирит и пирит имеют нестехиометрический состав. Для арсенопирита характерно обогащение серой (As/S от 0.77 до 0.99), наличие примесей Sb, Co, Ni и Cu общей концентрацией не более 0.15 мас. %. Пирит содержит те же элементы (общая концентрация до 3.71%), реже Pb, обеднён S и обогащён As (до 3.16 мас. %).

8. Проявление полного ряда минеральных ассоциаций золото-сульфидно-кварцевого ряда – пирит-арсенопирит-кварцевая метасоматическая, пирит-арсенопирит-кварцевая жильная, золото-полисульфидно-кварцевая и сульфосолюно-карбонатная.

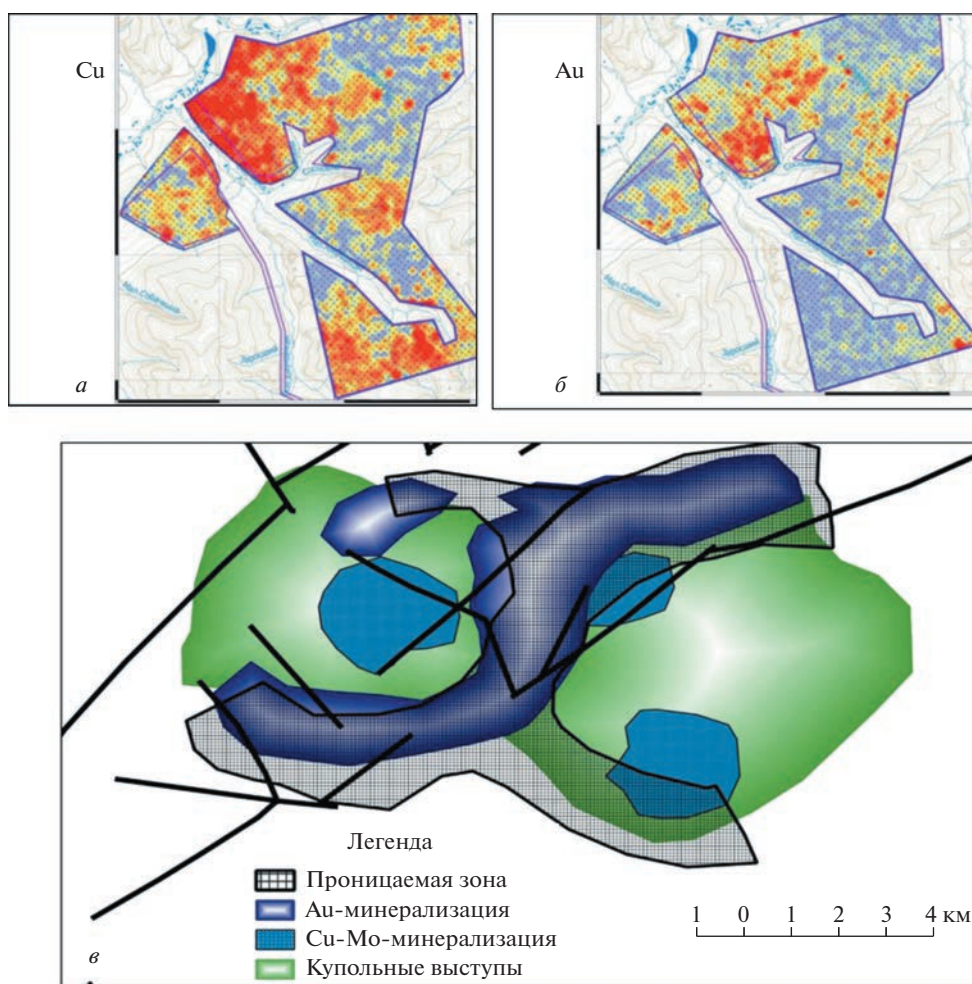
9. Мезотермальные температуры минералообразования, низко- и умеренно солёные рудообразующие флюиды от водно-углекислотного ( $H_2O-CO_2$ ) до водно-углекислотно-метанового ( $H_2O-CO_2-CH_4$ ) состава.

10. Наличие высококонтрастных геохимических аномалий As, Sb, Au, Ag, Pb, Zn.

Новые характеристики, сведения о происхождении и золотосодержании вкрапленной минерализации из метасоматитов, а также региональные и локальные признаки ОЗМ позволили определить положение участков, перспективных на обнаружение крупнообъёмных ОЗМ западного и центрального секторов Яно-Колымского металлогенического пояса (рис. 2).

Локальный прогноз является наиболее распространённым видом прогнозно-минерогенетических исследований и иллюстрируется нами на примере работы геологов и геохимиков Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в пределах Забайкальского края и Иркутской области.

**Локальный прогноз порфирового оруденения в районе Амуджиканского гранитного массива (Восточное Забайкалье).** Исходя из наиболее известной локальной модели медно-порфировой рудно-магматической системы с присущей ей металлогенической и геохимической вертикальной зональностью [7, 24] нами были проведены по-



**Рис. 3.** Моноэлементные (Cu — *a*, Au — *б*) геохимические аномалии в приконтактовой зоне Лево-Амуджиканского массива и локальная поисково-оценочная модель благороднометалльной и медно-молибденовой минерализации (*в*) [25]. Красным отмечены максимальные значения содержания элементов

исково-оценочные работы в районе Лево-Амуджиканского массива Могочинского района Забайкальского края. Результаты геохимической съёмки показаны на рисунке 3*а, б*. Металлогенические реконструкции по результатам геохимической съёмки на основе порфировой модели [25] позволили выделить два интрузивных купола с Cu-Mo-порфировой минерализацией в ядрах и золотой на флангах (рис. 3*в*). В зоне, контролирующей золотую минерализацию, также установлена вертикальная геохимическая зональность, связанная с разным уровнем эрозионного среза геологических блоков в её пределах.

**Локальный прогноз золотого оруденения сухоложского типа.** Пример применения локальных метаморфогенных металлогенических моделей — модель формирования руд сухоложского типа, основы которой составляют четыре позиции, изложенные ниже по материалам В.А. Буряка и других исследователей Бодайбинского района.

1. Углеродистые ( $C_{org}$  до 4 мас. %) терригенно-карбонатные толщи, являющиеся как источником рудного флюида, так и вмещающей матрицей для формирования рудных месторождений.

2. Рудные тела представлены объёмными штоками прожилково-вкрапленной минерализации, с незначительными содержаниями (первые г/т), но крупными запасами (>100 т) золота.

3. Наличие структурного (антиклинальные складки 3-го порядка) и литологического (контакт углеродсодержащих филитовидных сланцев с алевролитами) контроля.

4. Однообразный набор рудных минералов — пирит, пирротин, арсенопирит, галенит, реже сфалерит, халькопирит, самородное золото. При этом стадийность формирования рудной минерализации идентична, что связано с одинаковым развитием месторождений в рамках эволюционного развития территории.

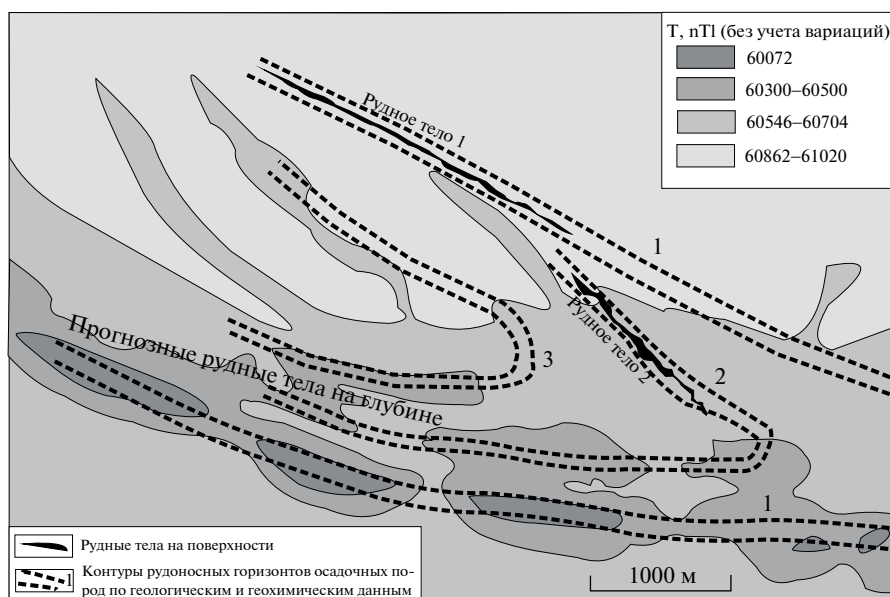


Рис. 4. Прогнозная геолого-геофизическая модель месторождения сухоложского типа Угахан, подтверждённая данными разведки [26]

На современном уровне знаний установлено, что все месторождения сухоложского генетического типа Бодайбинского района локализованы на одном Дальнетайгинско-Жуинском стратиграфическом горизонте, вмещающем крупные и гигантские месторождения золота.

Как уже отмечено выше, развиваемая модель базируется на представлениях, изначально предложенных первооткрывателем месторождения Сухой Лог В.А. Бураком. Концепция заключается в полихронном и полистадийном формировании месторождений: седиментация, катагенез, метаморфизм. Выделяются три этапа формирования руд данного типа: (I) прерудные этапы – осадконакопление и региональный метаморфизм, возникновение обогащённых органикой и благородными металлами стратиграфических уровней [3]; (II) ранний (главный), связанный с плутометаморфизмом; (III) поздний (герцинский магматизм). Метаморфические преобразования главного этапа делятся на две стадии: раннюю – прогрессивного метаморфизма с формированием пирротиновой минерализации, и собственно рудную, регрессивную стадию, с формированием пиритовой минерализации с золотом. Предложенная модель формирования месторождений сухоложского типа подтверждена нами многократно на различных объектах Бодайбинского района (Голец Высочайший, Красное, Светловское рудное поле, Угахан).

В рамках работ с горнорудной компанией “GV-Gold” изучалось месторождение Угахан. Согласно представленной концепции формирования месторождений сухоложского типа была

предложена идея о возможном положении оруденения в лежащем крыле антиклинали (рис. 4). В результате проведённых геофизических и литогеохимических работ выделены перспективные участки, которые позже были заверены буровыми работами. Был получен прирост запасов [26]. Аналогичные прогнозы осуществлялись нами по геохимическим и геофизическим работам на месторождении Красное и участке Батый. В первом случае также были выявлены прогнозируемые тела, во втором по результатам заверочного бурения обнаружены хорошие промышленные сечения.

Другим аспектом прогнозно-металлогенических исследований следует рассматривать **необходимость геолого-экономической переоценки известных объектов**, включая так называемую техногенку. Такая необходимость обусловлена тем, что при определении приоритетов в работах по восполнению минерально-сырьевой базы (МСБ) стратегических видов минерального сырья необходимо исходить из её реального состояния. Данное положение требует проведения комплексной геолого-экономической оценки (геологов совместно с экономистами) современного состояния МСБ этих ресурсов как в старопромышленных (особенно на нетрадиционные для них ресурсы металлов), так и во вновь осваиваемых (например, ряд территорий Арктики и прилегающих районов) регионах.

Кроме того, развитие технологий обогащения и извлечения сырья, изменение экономической ситуации имеют своим следствием смену подходов к освоению месторождений: для Au – от богатых локальных рудных тел к большеобъёмному

оруденению с низкими содержаниями Au 1–2 г/т; например, на месторождениях Албазино, Наталка и др., а также в Cu-порфировых рудах (Баимка, Малмыж) подсчитаны запасы в сотни тонн золота с 0.1–0.3 г/т содержаниями. Это ставит вопрос о переоценке ранее, казалось бы, неинтересных месторождений разных металлов.

Примерами весьма перспективных техногенных ресурсов являются отвалы горного производства и технологические отходы рудоизвлекающих фабрик крупных месторождений. Поэтому важным аспектом таких работ должна быть ревизия состояния отвального комплекса и хвостов отработки крупных месторождений разных металлов, прежде всего редких. Так, по данным Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита), “хвосты”, накопленные за 50 лет освоения Завитинского месторождения в Забайкалье, достигают 11.7 млн т техногенного сырья с 0.25–0.53%  $\text{Li}_2\text{O}$  [27]. А техногенные месторождения редкометалльных элементов (Li, Be, Rb, Cs) Ярославского ГОКа в Приморском крае, по данным Дальневосточного геологического института ДВО РАН (Владивосток), – это 28 млн т отходов флотации флюоритового концентрата, в которых содержится 0.45%  $\text{Li}_2\text{O}$ , а также промышленно интересные содержания Rb, Be и Cs.

Таким образом, академическая наука, разрабатывая фундаментальные основы металлогении, может вносить и конкретный вклад в решение прогнозно-металлогенических задач. Однако максимальный эффект достигается объединением усилий всех заинтересованных сторон, включая властные структуры (федеральные и региональные). При определении приоритетов необходимо исходить из реального состояния минерально-сырьевой базы высоколиквидных и технологичных минеральных ресурсов (ВТМР). С этой целью предлагается провести силами РАН, академических (Минобрнауки России) и прикладных (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) институтов предварительную комплексную геолого-экономическую оценку современного состояния минерально-сырьевой базы этих ресурсов как в старопромышленных регионах (на нетрадиционные для них ресурсы металлов), так и во вновь осваиваемых (например, ряд Арктических и Приарктических территорий). Такая переоценка должна стать начальной фазой федеральной Программы прогнозно-минерогенических работ (инициатива ЦНИГРИ МПР), которые необходимо развернуть в ближайшем будущем по профилю МПР РФ и Роснедр. Академия наук и академические институты должны принять активное участие в этой деятельности. Её результатом будет определение специализации тех или иных регионов на соответствующие

виды ВТМР, что позволит рациональнее подойти к их последующему освоению.

Объединение усилий недропользователей, институтов и предприятий геологической отрасли и Российской академии наук в рамках реализации интеграционных федеральных и региональных проектов в старопромышленных и слабо освоенных регионах позволит в краткие сроки (3–5 лет) преодолеть тенденцию истощения минерально-сырьевой базы и решить проблему ресурсов, в отношении которых сложилась критическая зависимость от импорта.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование вкрапленной минерализации Яно-Колымского пояса поддержано ИГАБМ СО РАН (FUEM-2019-0004). Исследование оруденения Забайкалья и Бодайбинского района поддержано ИГХ СО РАН (тема 0284-2021-0001).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев Н.А. Рудные месторождения в истории Земли: тектоно-металлогенический очерк. Владивосток: Дальнаука, ИП Сердюк О.А., 2021.
2. Sillitoe R.H. Copper Provinces // SEG Special Publication. 2012. № 16. P. 1–18.
3. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А. и др. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.
4. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V. et al. Mineralogical and isotope-geochemical ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and Pb–Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. V. 119. April 2020. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
5. Смирнов С.С. О Тихоокеанском рудном поясе // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1946. № 2. С. 13–28.
6. Радкевич Е.А. Металлогения Тихоокеанского рудного пояса // Металлогения Тихоокеанского рудного пояса. Владивосток: Изд-ва ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 3–16.
7. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Economic Geology. 2010. V. 105. P. 3–41.
8. Колова Е.Е., Глухов А.Н. Медно-порфировые месторождения Северного Приохотья – поисковые предпосылки и их реализация // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов XII Международной научно-практической конференции. 11–14 апреля 2023 г., Москва, ЦНИГРИ. С. 237–240.
9. Rundquist D.V. Accumulation of metals and the evolution of the genetic types of deposits in the history of the Earth // International geological congress. 23 session.

- Czechoslovakia, 1968. Proceedings. Section 7. Endogenous ore deposits. Prague: Academia, 1968. P. 85–97.
10. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 68. № 2. С. 97–119.
  11. Волков А.В., Галямов А.Л., Лобанов К.В. Геодинамические обстановки формирования месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2 (34). С. 110–119.
  12. Волков А.В. Новые подходы к прогнозированию крупных месторождений стратегических металлов // VM-Novitates. Новости из геологического музея им. В.И. Вернадского. 2013. № 1(17). С. 22–30.
  13. Горячев И.Н. Mineral prospectivity mapping для прогноза месторождений золота Центрально-Колымского региона (Магаданская область, Россия) // Геоинформатика. 2023. № 1. С. 4–17. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-4-17>
  14. Карамышев А.В., Фёдорова К.С., Тарасов А.В. Прогноз скрытого золотого оруденения в пределах Центрально-Колымского района по комплексу геолого-геофизических признаков методом распознавания // Руды и металлы. 2020. № 2. С. 10–24. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10010>
  15. Frimmel H.E. Earth's Continental Crustal Gold Endowment // Earth and Planetary Science Letters. 2008. № 267. P. 45–55.
  16. Goldfarb R.J., Baker T., Dube B. et al. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 407–450.
  17. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Кудрин М.В., Горячев Н.А. Изотопный состав серы и геохимические характеристики золотоносных сульфидов орогенного месторождения Бадран, Яно-Колымский металлогенический пояс (северо-восток Азии) // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 3–9.
  18. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Кудрин М.В. Геохимические и изотопные характеристики вкрапленной сульфидной минерализации орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса (северо-восток России) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 24–31.
  19. Fridovsky V.Yu., Polufuntikova L.I., Kudrin M.V. Origin of disseminated gold-sulfide mineralization from proximal alteration in orogenic gold deposits in the Central Sector of the Yana–Kolyma metallogenic belt, NE Russia // Minerals. 2023. Т. 13. № 3. С. 394–434.
  20. Протопопов Р.И., Трущелев А.М., Протопопов Г.Х. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-53 – Верхоянск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. С. 437.
  21. Протопопов Г.Х., Трущелев А.М., Кузнецов Ю.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-54 – Усть-Нера. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. С. 845.
  22. Казакова Г.Г., Васькин А.Ф., Кропачев А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-54 – Оймякон. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. С. 400.
  23. Шпикерман В.И., Полуботко И.В., Васькин А.Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 – Сусуман. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. С. 520.
  24. Kouzmanov K., Pokrovski G. Hydrothermal Controls on Metal Distribution in Porphyry Cu (–Mo–Au) Systems // SEG Special Publication. 2012. № 16. P. 573–618.
  25. Будяк А.Е., Ефремов С.В., Скузоватов С.Ю. и др. Комплексные исследования разнотипных рудообразующих систем в прогнозно-поисковых целях // Материалы юбилейной конференции Института геохимии СО РАН. Иркутск, 22–25 ноября 2022 г. Т. 1. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2022. С. 76–79.
  26. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений “Ожерелье”, “Ыканское”, “Угахан” и “Голец Высочайший” // Науки о Земле и недропользование. 2019. 42 (4). С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>

## СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛИТИЯ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО, ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

© 2023 г. А. Ю. Цивадзе<sup>a,\*</sup>, В. Е. Баулин<sup>a,b,\*\*</sup>, Г. В. Костикова<sup>a,\*\*\*</sup>, А. А. Бездомников<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии, Черноголовка, Россия

\*E-mail: atsiv43@mail.ru

\*\*E-mail: mager1988@gmail.com

\*\*\*E-mail: galyna\_k@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: bezdomnikovaa@phycs.ac.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 16.06.2023 г.

Россия обладает большими запасами лития, позволяющими полностью обеспечить внутренние потребности рынка нашей страны с перспективой развития отечественных производств литий-ионных аккумуляторов, электротранспорта, беспилотных устройств и портативной электроники. Добыча лития – сложный процесс, который определяется климатом, составом рассола и эффективностью доступных технологий. Сегодня российские технологии извлечения лития развиваются в двух направлениях: сорбционное и экстракционное. В статье, подготовленной по материалам доклада, заслушанного на заседании президиума РАН 11 апреля 2023 г., рассматриваются общие тенденции и перспективы совершенствования методов извлечения лития, включая жидкостную экстракцию и сорбцию.

**Ключевые слова:** литий, сырьевые источники, методы извлечения, экстракция, сорбция.

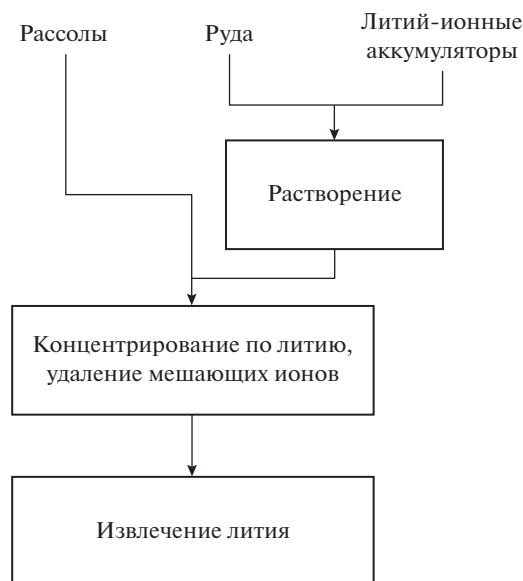
**DOI:** 10.31857/S0869587323070101, **EDN:** RPXOOQ

Время безграничных возможностей и больших вызовов – именно так можно охарактеризовать текущее десятилетие. Блокчейн и искусственный интеллект, робототехника и беспилотные устройства, водородная и возобновляемая энергетика, электротранспорт, новые спутниковые технологии и высокотехнологичная медицина – всё это на наших глазах стремительно преобразует окружающий мир. Взрывной рост технологий вселяет

надежды и оптимизм относительно будущего человечества. Однако параллельно надвигаются большие вызовы, такие как перманентные экономические и политические кризисы, социальная напряжённость, новая гонка вооружений, пандемии, истощение ресурсной базы, изменение климата. Преодолению некоторых вызовов могут способствовать новые технологии. Успех их внедрения зависит от множества взаимосвязанных факторов. Остановимся на одном из них.

ЦИВАДЗЕ Аслан Юсупович – академик РАН, заместитель президента РАН, научный руководитель ИФХЭ РАН. БАУЛИН Владимир Евгеньевич – доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем ИФХЭ РАН, заведующий лабораторией фосфорорганических соединений ИФАВ. КОСТИКОВА Галина Валерьевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем ИФХЭ РАН. БЕЗДОМНИКОВ Алексей Александрович – младший научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем ИФХЭ РАН.

Значимым элементом современных технологий выступает литий. Литиевые источники тока играют ключевую роль в беспилотных устройствах, возобновляемой энергетике, электротранспорте и других сферах. Сам литий применяется не только в производстве литий-ионных аккумуляторов, но и высококачественных стёкол, керамики, смазочных материалов, в металлургии и атомной промышленности. За последнее десятилетие структура потребления лития претерпела значительные изменения. Спрос на этот металл



**Рис. 1.** Общая схема добычи лития из твердого и жидкого литиевого сырья

постоянно растёт, повышая его стоимость, опережая недостаточный рост производства.

Ограниченность производства лития связана со сложностями его добычи и особенностями его присутствия в природе. Большая часть этого металла в очень малых концентрациях рассредоточена в морской воде, добыча из которой на нынешнем уровне технологий не окупится, и лишь небольшая доля располагается компактно. Такие запасы присутствуют в литиевой руде, солёных озёрах, геотермальных водах и различных техногенных рассолах. Руда долгое время служила основным источником лития, однако наиболее рентабельные месторождения уже эксплуатируются, а часть их истощилась. Ведущую роль в качестве источника лития приобретают литиевые рассолы, но здесь особенно остро строит проблема селективного извлечения целевого продукта. Литиевые рассолы справедливее называть натриевыми, кальциевыми или магниевыми, так как по большей части они содержат именно Na, Ca, Mg. Содержание же лития редко превышает 0.5 г/л на фоне десятков и сотен граммов других щелочных и щелочноземельных металлов. Низкая концентрация и схожесть свойств с элементами-макрокомпонентами рассола чрезвычайно усложняют добычу.

В общем случае возможность добычи лития определяется энергетическим балансом, отсюда возникает вопрос: реально ли его извлечение без затрат избыточного количества энергии? Энергетический баланс при этом определяется условиями климата, составом рассола и доступными технологиями. Степень аридности климата

позволяет оценить применимость методов гелио-концентрирования, с помощью которых можно попытаться повысить содержание лития в рассоле без затрат электроэнергии. Состав рассола определяет применимость галлургической схемы выделения лития; с ростом соотношения Mg/Li, Ca/Li эта схема теряет эффективность и в конечном итоге становится неприменимой. В свою очередь, доступность и качество технологий приобретают решающее значение при добыче лития из рассолов, залегающих на территориях с неаридным климатом и высоким содержанием Mg и Ca.

Исключая из рассмотрения дорогостоящие физические методы разделения веществ, например, электромагнитное разделение, добыча лития из всех видов источников имеет общий путь (рис. 1). Твёрдое сырьё (руда или отработавшие литий-ионные аккумуляторы) переводится в литийсодержащий раствор, при этом применяются методы физического разделения компонентов, пиро- и гидрометаллургии [1]. Попутно с переводом твёрдого сырья в литийсодержащий раствор возможно выделение различных компонентов, что определяется для каждого конкретного случая (Стадия перевода твёрдого сырья в литийсодержащий рассол — отдельная большая тема, оставляемая нами за рамками данной работы). Полученный литийсодержащий раствор можно отнести к техногенным наряду с получаемыми при добыче нефти, газа, алмазов и т.д. Как техногенные, так и природные рассолы нуждаются в подготовке, она необходима для повышения концентрации лития до рабочей и удаления компонентов, препятствующих его извлечению, а её особенности зависят от конечного метода получения целевого продукта.

Финальное извлечение лития чаще всего реализуется методом осаждения или перекристаллизации, что требует значительного концентрирования по литию. Например, если мы имеем природный рассол с концентрацией Li 0.1 г/л, то в идеальном случае для выделения 90% лития в виде  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  потребуется сконцентрировать исходный раствор приблизительно в 100 раз, то есть практически выпарить его досуха. Если не учитывать присутствие магния и кальция в рассолах, организовать такое концентрирование даже в условиях аридного климата весьма сложно.

Процесс солнечного испарения широко используется в промышленной добыче лития из рассолов. Этот метод позволяет получать литиевые концентраты, содержащие примерно до 5–10 г/л Li, в зависимости от исходного состава рассола. Метод применим только в засушливых, солнечных регионах, то есть в районах с аридным климатом. Для получения концентрата необходим каскад прудов общей площадью в тысячи

гектар и длительное время — от нескольких месяцев до 2 лет.

Рассол в процессе гелиоконцентрирования перекачивается между прудами, в которых в зависимости от исходного состава рассола поэтапно осаждаются NaCl, KCl, различные двойные соли и отделяются щелочноземельные металлы в виде  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  путём добавления в рассол известкового молока ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), соды ( $\text{NaHCO}_3$ ), кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) или различных кислот [2].

Эффективность такого извлечения крайне низка, варьируется от 15 до 70% (большая часть потерь лития связана с его захватом при перекристаллизации побочных солей и с испарением) [2–4]. Помимо низкой эффективности и селективности, метод требует расхода большого количества реагентов, времени, площади и пагубно отражается на экологии из-за засаливания и эрозии почв, значительного расхода пресной воды, которая и без того дефицитна в засушливых регионах. Эти процессы негативно сказываются на благополучии местного населения, вызывая его отток, усиливая социальное напряжение [5].

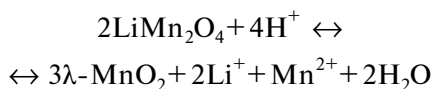
В настоящее время наблюдается чёткий тренд на развитие литий-селективных технологий, позволяющих значительно сократить энергоёмкость стадии концентрирования рассолов и удаления мешающих/сопутствующих ионов. Активно развиваются методы жидкостной экстракции, сорбции и различные мембранные процессы.

Литий-ионная ситовая (LIS) адсорбция как одна из разновидностей сорбционных методов извлечения позволяет получать литий из рассолов за счёт обратимой интеркаляции лития в кристаллической решётке ионных сит. Можно выделить два основных кандидата на использование в качестве LIS — оксиды лития-марганца (LMO) и оксиды лития-титана (LTO). Помимо LMO и LTO рассматриваются и другие LIS, включая  $\text{LiSbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiMg}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ ,  $\text{LiAlMnO}_4$  и  $\text{LiFeMnO}_4$  [6–9]. Сорбционная ёмкость по литию для таких материалов может достигать 95 мг/г [10].

Извлечение лития, как предполагается, происходит за счёт следующих реакций. Ионный обмен:



поверхностное диспропорционирование:



Предполагается, что эти два процесса происходят параллельно, при этом второй процесс негативен, так как приводит к разрушению ионного сита и высвобождению катионов марганца (II).

Существует отечественная разработка получения литиевых концентратов с помощью разновидности двойного гидроксида алюминия лития ДГАЛ-Cl [11]. При обработке литийсодержащим хлоридным раствором ДГАЛ-Cl с дефицитом в нём LiCl происходит восстановление исходного состава двойного соединения  $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Такая обратимая интеркаляция–деинтеркаляция может повторяться многократно. Для лучшего сорбента, полученного методом химического осаждения ДГАЛ-Li из раствора LiCl, ёмкость составляет 8.8–9.8 мг/г, что значительно ниже, чем для сорбентов на основе оксидов лития-марганца и оксидов лития-титана.

Однако на сегодняшний день литий-ионные сита далеки от использования в промышленных масштабах. Основные их недостатки: низкая скорость обмена, дороговизна синтеза, опасность попадания в сточные воды, высокие потери из-за нестабильности структуры. К сожалению, чаще всего повышение стойкости и ресурса сорбента сопровождается снижением его ёмкости и значительным удорожанием.

Существуют так называемые электрохимические ионные насосы (EIP), в которых рабочий электрод способен под действием электрического тока интеркалировать ионы лития. Принцип EIP заключается в улавливании  $\text{Li}^+$  из рассола при подаче одного потенциала и высвобождении лития в раствор при подаче другого потенциала. В качестве электродов могут использоваться  $\lambda\text{-MnO}_2$  [12],  $\text{LiFePO}_4$  [13],  $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  [14] и т.д. Такая электрохимическая экстракция Li является многообещающей технологией при условии, что будут разработаны высокоэффективные ионоселективные электроды, обладающие большой ёмкостью по Li, долговечностью и низкой себестоимостью.

С недавнего времени большое внимание стало уделяться мембранным технологиям извлечения лития, при этом уже разработаны методы, позволяющие одновременно выделять литий и получать питьевую воду [15]. Но, к сожалению, эти технологии неэффективны в высококонцентрированных рассолах, а в полную силу они работают только в случае с морской водой и некоторыми предварительно подготовленными для этого процесса рассолами солёных озёр.

С промышленной точки зрения наиболее перспективно развитие методов жидкостной экстракции, так как они обеспечивают наибольшую производительность процесса при наименьших энергозатратах и простоте аппаратного оформления.

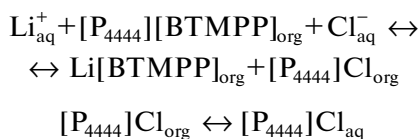
Исследования выделения лития из растворов щелочных и щелочноземельных металлов природного происхождения или продуктов выщелачивания из минерального сырья методами жид-

костной экстракции растворителем проводятся начиная с XVIII в. За это время рассмотрен широкий спектр веществ, и наиболее эффективными оказались спирты, эфиры и их смеси [16–18].

Для крупнотоннажного производства лития органические растворители в качестве экстрагентов практически не рассматриваются, так как имеют существенные недостатки, в их числе низкая температура кипения, высокая токсичность, пожаро- и взрывоопасность, низкая степень извлечения и селективность экстракции. Многие органические растворители, эффективные в случае солей лития, имеют склонность растворять в себе определённые количества воды [19], а вместе с ней соли натрия, калия, магния и кальция, что делает процесс экстракции неселективным, а при отгонке растворителей возможны побочные реакции. Из-за низких коэффициентов распределения лития и разделения его с щелочными и щелочноземельными металлами возникает необходимость предварительного концентрирования или большого количества ступеней экстракции. Сегодня жидкостную экстракцию чистым растворителем используют лишь для удаления соединений бора из литиевого сырья с помощью н-октанола [20].

В последнее время ионные жидкости и глубокие эвтектические растворители рассматриваются в качестве альтернативы традиционным органическим растворителям. Ионная жидкость — это органическая соль, состоящая из органического катиона и органического или неорганического аниона с температурой плавления ниже комнатной 100°C. Основные преимущества этих растворителей проявляются в чрезвычайно низком давлении паров и высокой химической и термической стабильности, низкой растворимости в воде при высокой растворяющей способности. Поэтому замена легколетучих органических растворителей на ионные жидкости исключает потери растворителя с выходом его в атмосферу, снижая как экологический след, так и стоимость процесса.

Экстракция ионными жидкостями может происходить по сольватному и по ионообменному механизму, при котором катион ионной жидкости замещается катионом металла, образуя ионную пару с анионом литиевой соли. Примером может служить экстракция лития тетрабутилфосфоний бис(2,4,4-триметилпентил)фосфинатом ([P<sub>4444</sub>][BTMPP]) [21]:



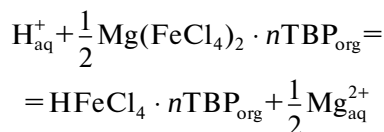
К недостаткам существующих ионных жидкостей можно отнести их высокую стоимость, относительно высокую вязкость и плотность. В целом

ионные жидкости как самостоятельные экстрагенты проявляют крайне низкую литий-селективность с коэффициентами разделения в несколько единиц в ряду щелочных металлов и с большей селективностью в отношении щелочноземельных металлов, чем щелочных.

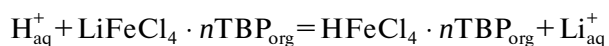
Наиболее распространены, особенно в Китае, экстракционные системы извлечения лития на основе хлорида железа и трибутилфосфата (ТБФ). Ряд селективности экстракции для таких систем:  $\text{H}^{+} > \text{Li}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Ca}^{2+} > \gg \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > > \text{K}^{+}$ . Механизм экстракции лития в присутствии трибутилфосфата и хлорида железа (III) детально изучен в работах [22–24], состав экстрагируемого комплекса имеет вид  $[\text{Li}(\text{TБФ})_x(\text{H}_2\text{O})_{4-x}][\text{FeCl}_4]$  (где  $x = 1-2$ , координация трибутилфосфата с литием происходит за счёт электростатических взаимодействий катиона и кислорода фосфатной —  $\text{P}=\text{O}$  группы). Процесс экстракции лития системами на основе  $\text{FeCl}_3$  и ТБФ можно разделить на несколько этапов:



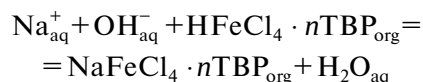
экстракция, в ходе которой литий замещает катион в органическом комплексе, этим катионом может быть не только  $\text{H}^{+}$ , но и  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  в зависимости от того, подвергалась ли органическая фаза омылению/регенерации перед этапом экстракции; помимо извлечения целевого компонента происходит и экстракция побочных в соответствии с рядом селективности и концентраций этих компонентов;



промывка, в ходе которой удаляются побочно захваченные компоненты, такие как  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{B}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Na}^{+}$  и  $\text{K}^{+}$ ; параллельно с промывкой происходит частичное удаление лития из органической фазы, варьируя условия промывки можно минимизировать эти потери;



реэкстракция, в ходе которой  $\text{Li}^{+}$  полностью удаляется из экстракта;



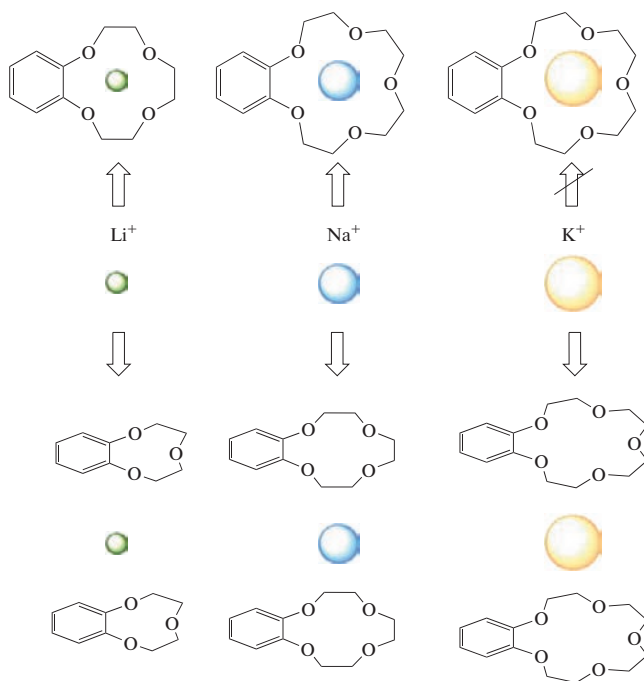
регенерация экстрагента/омыление, в ходе которой экстрагент подвергается обработке щелочами или карбонатами для замещения  $\text{H}^{+}$  в органическом комплексе на менее литий-конкурентные

ионы с целью повышения эффективности экстракции.

Как показано в работе [25], для существования  $[\text{FeCl}_4]$  необходимо поддерживать высокое, порядка 6 моль/л, содержание в водной фазе хлорид-ионов. Для поддержания высокого содержания хлорид-ионов можно использовать различные соли, например  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ , лучше всего подходит  $\text{MgCl}_2$  из-за наибольшей высаливающей способности и небольшой конкуренции в процессе экстракции с  $\text{Li}^+$ . Помимо концентрации хлорид-ионов в системе нужно регулировать соотношение  $\text{Fe/Li}$ , которое влияет на эффективность экстракционного процесса. Оптимальное соотношение выбирается исходя из целевых показателей и зависит от условий проведения процесса, от составов водной и органической фаз на каждом этапе. В таких системах получаемый литиевый экстракт чаще всего имеет низкую чистоту и загрязнён натрием и железом. Помимо этого данная система оказывается чрезвычайно коррозионно-активной, сложной в организации и экологически небезопасной, что требует использования дорогого оборудования и соблюдения особых правил утилизации отработанных рассолов.

Многие макроциклические соединения, такие как краун-эфиры [26–29], макроциклические ионофоры [30, 31], криптанды [32–35], каликсарены и каликсспирролы [36, 37], порфирины [38], сферанды [39], макроциклические комплексы [40] и подобные макроциклам фосфорил-поданды [41–43] способны селективно связывать литий. На данный момент достаточное количество экспериментальных данных по жидкостной экстракции лития макроциклическими соединениями имеется лишь для краун-эфиров.

Краун-эфиры способны связываться с ионами металлов за счёт электростатических взаимодействий, обладая при этом высокой стереоспецифичностью [44]. Особенно сильно стереоспецифичность проявляется для щелочных и щелочно-земельных металлов. Наибольшая стабильность комплекса наблюдается при соответствии размера полости краун-эфира с диаметром иона металла [26, 31, 32]. Изменяя тип и количество донорных атомов, размер кольца краун-эфира и заместителя в боковой цепи можно регулировать пространственную структуру краун-эфиров и их стереоспецифичность. Из-за способности краун-эфиров “подстраиваться” под различные катионы и менять конформации, а также образовывать сэндвичевые комплексы селективность этих соединений может зависеть от условий проведения эксперимента. Таким образом, на селективность влияют тип краун-эфира, тип боковых заместителей в краун-эфире, растворитель, тип аниона,

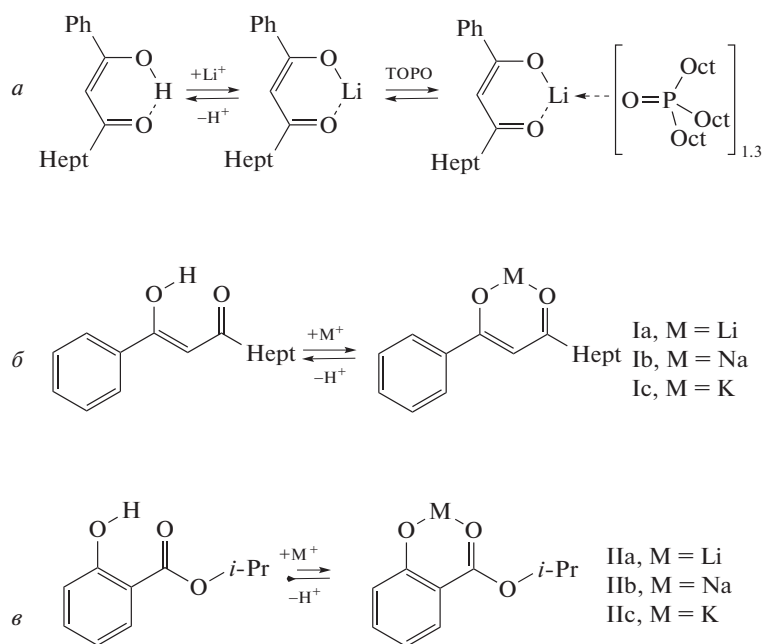


**Рис. 2.** Комплексообразование щелочных металлов лития, натрия и калия с бензо-9-краун-3, бензо-12-краун-4 и бензо-15-краун-5, образующими одиночный или сэндвич-комплекс

концентрация компонентов рассола и их соотношение (рис. 2).

Краун-эфиры и другие макроциклические соединения перспективны в качестве экстрагентов. Но, к сожалению, общедоступные и приемлемые по цене краун-эфиры имеют очень низкую эффективность экстракции лития из многокомпонентных растворов и уступают системам на основе орто-замещённых фенолов, 1,3-дикетонных систем на основе  $\text{FeCl}_3 + \text{ТБФ}$ . Для промышленного выделения лития высокоселективными краун-эфирами требуется разработка новых, более эффективных методов их синтеза.

Смеси 1,3-дикетонных (ДК) и нейтральных экстрагентов трибутилфосфата (ТБФ)/триоктилфосфин оксида (ТОРО) количественно извлекают литий из щелочных растворов, содержащих большие избытки  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  [45–47]. Степень извлечения щелочных металлов такими смесями закономерно уменьшается в ряду  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  по мере увеличения ионных радиусов щелочных металлов. Извлечение лития происходит через хелатирование енольной формой 1,3-дикетона по катион-обменному механизму с образованием шестичленного металлоцикла с последующей координацией с электронодонорными молекулами, такими как ТОРО [31] (рис. 3 а). Несмотря на то, что 1,3-дикетоны экстрагируют магний лучше, чем литий, это не всегда оказывается ограниче-



**Рис. 3.** Механизм синергетической экстракции лития смесью фенилдекан-1,3-дикетона и ТОФО — а; схема формирования структуры координационных соединений: фенилдекан-1,3-диона (Ia-с) — б, изопропилсалицилата (IIa-с) с катионами лития, натрия и калия — в

нием. За счёт большой разницы в экстрагируемости Mg и Li возможна организация процесса разделения лития и магния, в котором выделение лития происходит не на этапе экстракции и реэкстракции, а на этапах промывки [48, 49]. Весьма интересен вариант реализации селективной реэкстракции лития при использовании фосфорной кислоты в качестве реэкстрагента [50]. Однако 1,3-дикетоны — относительно труднодоступные и дорогие соединения, а их производство и использование может сопровождаться экологическими рисками.

Практически все известные в настоящее время литий-селективные экстрагенты были открыты ещё в прошлом веке, и большая часть публикуемых в последнее время работ посвящена детальному их изучению. В связи с этим весьма значимо, что в работах ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина [51, 52] впервые для использования в качестве новых перспективных литий-селективных экстрагентов были предложены эфиры салициловой кислоты. Согласно концепции Р. Пирсона [53], салицилаты также являются жёсткими основаниями и должны образовывать координационные хелаты с жёсткими кислотами, такими как катионы щелочных и щелочноземельных металлов. В наших работах было показано, что за счёт структурного и функционального сходства эфиры салициловой кислоты, как и 1,3-дикетоны, могут образовывать шестичленные металлоциклы с катионами щелочных металлов, устойчивость которых определяет селективность ком-

плексообразования с катионами лития, натрия и калия (рис. 3 б, в). Результаты лабораторного моделирования процессов извлечения лития с использованием эфиров салициловой кислоты показали их высокую эффективность и стойкость в широком диапазоне концентраций [52, 54]. Использование эфиров салициловой кислоты в качестве новых литий-селективных экстрагентов открывает путь к изучению целого ряда других производных салициловой кислоты и в целом орто-замещённых фенолов с возможностью более тонкой модификации экстрагентов, в отличие от 1,3-дикетонов.

Принципиальная схема извлечения лития жидкостной экстракцией с использованием литий-селективных экстрагентов из гидроминеральных источников сырья сводится к двум стадиям: 1) экстракционное разделение щелочных и щелочноземельных металлов; 2) экстракционное выделение лития из смеси щелочных металлов. Рассолы (рафинат) после извлечения лития по свойствам не отличаются от исходных литийсодержащих рассолов, что позволяет использовать их для получения других ценных компонентов (бром, стройматериалы, противогололёдные реагенты, пресная вода) или повторно в соответствии с исходным назначением, например в процессах добычи нефти и газа.

Коммерчески доступные промышленные экстракторы могут обеспечить производительность 1–120 м<sup>3</sup>/ч, что со степенью извлечения лития, достигающей 95%, позволит на одной экстракции

онной линии получать от 2.02 до 242.8 кг  $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{ч}$  для рассолов со средним содержанием лития 0.2 кг/м<sup>3</sup> (по металлу). При организации непрерывного производства 1 год работы экстракционной линии позволит добывать от 17.7 до 2127.1 т  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Увеличение количества экстракционных линий не сопряжено с техническими сложностями, так как они могут работать параллельно и независимо друг от друга. Таким образом, применение традиционных экстракционных технологий в сочетании с инновационными, экологически безопасными и дешёвыми экстрагентами позволит полностью удовлетворить внутренние потребности российского рынка в литии с перспективой развития отечественных производств литий-ионных аккумуляторов, электротранспорта, беспилотных устройств и портативной электроники.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта 122011300052-1).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wei Q. *et al.* Spent lithium ion battery (LIB) recycle from electric vehicles: A mini-review // *Sci. Total Environ.* Elsevier B.V. 2023. V. 866. August 2022. Article number 161380.
2. Рябцев А.Д. Переработка литиеносного поликомпонентного гидроминерального сырья на основе его обогащения по литию. Дис. докт. тех. наук: 05.17.02. Новосибирск, 2011.
3. Hamzaoui A.H. *et al.* Contribution to the lithium recovery from brine // *Desalination*. 2003. V. 158. № 1–3. P. 221–224.
4. Swain B. Recovery and recycling of lithium: A review // *Sep. Purif. Technol.* Elsevier B.V. 2017. V. 172. P. 388–403.
5. A race for lithium is sparking fears of water shortages in northern Argentina. <https://climatechangenews.com/2022/01/07/race-lithium-sparking-fears-water-shortages-northern-argentina/> (дата обращения: 01.06.2023).
6. Ooi K. *et al.* Lithium-ion Insertion/Extraction Reaction with  $\lambda$ - $\text{MnO}_2$  in the Aqueous Phase // *Chem. Lett. The Chemical Society of Japan*. 1988. V. 17 № 6. P. 989–992.
7. Shi X. *et al.* Synthesis and properties of  $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$  and its adsorption application // *Hydrometallurgy*. Elsevier. 2011. V. 110. № 1–4. P. 99–106.
8. Fourquet J.L., Gillet P.A., Le Bail A.  $\text{Li}^+ \text{H}^+$  topotactic exchange on  $\text{LiSbO}_3$ : The series  $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{SbO}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) // *Mater. Res. Bull.* 1989. V. 24. № 10. P. 1207–1214.
9. Yu C.L. *et al.* Peculiar shuttle-like nano-sized  $\text{TiO}(\text{OH})_2/\text{C}$  lithium ion sieve with improved adsorption rate and cycling reliability: Preparation and kinetics // *Hydrometallurgy*. Elsevier B.V. 2021. V. 203. Article number 105627.
10. Lawagon C.P. *et al.* Adsorptive  $\text{Li}^+$  mining from liquid resources by  $\text{H}_2\text{TiO}_3$ : Equilibrium, kinetics, thermodynamics, and mechanisms // *J. Ind. Eng. Chem. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry*. 2016. V. 35. P. 347–356.
11. Рябцев А.Д. и др. Научные основы производства селективного к литию сорбента и промышленной технологии извлечения хлорида лития из гидроминерального поликомпонентного сырья // *Технология неорганических веществ и материалов*. 2020. № 8. С. 338–352.
12. Lee J. *et al.* Highly selective lithium recovery from brine using a  $\lambda$ - $\text{MnO}_2$ -Ag battery // *Phys. Chem. Chem. Phys. The Royal Society of Chemistry*. 2013. V. 15. № 20. P. 7690.
13. Trócoli R., Battistel A., La F. Selectivity of a Lithium-Recovery Process Based on  $\text{LiFePO}_4$  // *Chem. Eur. J. Wiley-VCH Verlag*. 2014. P. 9888–9891.
14. Lawagon C.P. *et al.*  $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.33}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2/\text{Ag}$  for electrochemical lithium recovery from brine // *Chem. Eng. J. Elsevier B.V.* 2018. V. 348. P. 1000–1011.
15. Kalmykov D. *et al.* Operation of three-stage process of lithium recovery from geothermal brine: Simulation // *Membranes (Basel)*. 2021. V. 11. № 3. P. 1–21.
16. Caley E.R., Axilrod H.D. Separation of Lithium from Potassium and Sodium by Treatment of Chlorides with Higher Aliphatic Alcohols // *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. American Chemical Society* 1942. V. 14. № 3. P. 242–244.
17. Gabra G.G., Torma A.E. Lithium chloride extraction by *n*-butanol // *Hydrometallurgy*. Elsevier. 1978. V. 3. № 1. P. 23–33.
18. Bukowsky H., Uhlemann E. Selective Extraction of Lithium Chloride from Brines // *Sep. Sci. Technol.* 1993. V. 28. № 6. P. 1357–1360.
19. Kahlenberg L., Krauskopf F.C. A new method of separating lithium chloride from the chlorides of the other alkalis, and from the chloride of barium // *J. Am. Chem. Soc. American Chemical Society*. 1908. V. 30. № 7. P. 1104–1115.
20. Chagnes A., Swiatowska J. Lithium process chemistry: Resources, extraction, batteries, and recycling // *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling*. 1st ed. Elsevier Ltd, 2015.
21. Shi C. *et al.* Liquid-liquid extraction of lithium using novel phosphonium ionic liquid as an extractant // *Hydrometallurgy*. Elsevier B.V. 2017. V. 169. P. 314–320.
22. Zhou Z. *et al.* A study on stoichiometry of complexes of tributyl phosphate and methyl isobutyl ketone with lithium in the presence of  $\text{FeCl}_3$  // *Chinese J. Chem. Eng. Elsevier*. 2012. V. 20. № 1. P. 36–39.
23. Zhou Z. *et al.* Elucidation of the structures of tributyl phosphate/Li complexes in the presence of  $\text{FeCl}_3$  via UV-visible, Raman and IR spectroscopy and the method of continuous variation // *Chem. Eng. Sci. Pergamon*. 2013. V. 101. P. 577–585.
24. Song J. *et al.* Recovery of lithium from salt lake brine of high Mg/Li ratio using  $\text{Na}[\text{FeCl}_4 \cdot 2\text{TBP}]$  as extractant: Thermodynamics, kinetics and processes // *Hydrometallurgy*. Elsevier B.V. 2017. V. 173. P. 63–70.
25. Zhou Z. *et al.* Extraction equilibria of lithium with tributyl phosphate in kerosene and  $\text{FeCl}_3$  // *J. Chem. Eng. Data. American Chemical Society*. 2012. V. 57. № 1. P. 82–86.

26. *Torres R.E.C. et al.* Design of lithium selective crown ethers: Synthesis, extraction and theoretical binding studies // *Chem. Eng. J. Elsevier B.V.* 2017. V. 326. P. 921–933.
27. *Kobiro K.* New class of lithium ion selective crown ethers with bulky decalin subunits // *Coord. Chem. Rev. Elsevier.* 1996. V. 148. P. 135–149.
28. *Walkowiak W., Charewicz W.A., Jeon E.G.* Selective transport of alkali metal cations in solvent extraction by proton-ionizable dibenzocrown ethers // *J. Coord. Chem. Taylor & Francis Group.* 1992. V. 27. № 1–3. P. 75–85.
29. *Bartsch R.A. et al.* Influence of ring substituents and matrix on lithium / sodium selectivity of 14-crown-4 and benzo-13-crown-4-compounds // *Anal. Chim. Acta.* 1993. V. 272. № 2. P. 285–292.
30. *Gohil H. et al.* An Ionophore for High Lithium Loading and Selective Capture from Brine // *Inorg. Chem. American Chemical Society.* 2019. V. 58. № 11. P. 7209–7219.
31. *Swain B.* Separation and purification of lithium by solvent extraction and supported liquid membrane, analysis of their mechanism: a review // *J. Chem. Technol. Biotechnol. John Wiley & Sons.* 2016. V. 91. № 10. P. 2549–2562.
32. *Izatt R.M. et al.* Thermodynamic and Kinetic Data for Macrocyclic Interaction with Cations and Anions // *Chem. Rev. American Chemical Society.* 1991. V. 91. № 8. P. 1721–2085.
33. *Bencini A. et al.* Synthesis and Characterization of the New Macrocyclic Cage 5,12,17-Trimethyl-1,5,9,12,17-pentaazabicyclo[7.5.5]nonadecane (L), Which Can Selectively Encapsulate Lithium Ion Thermodynamic Studies on Protonation and Complex Formation. Crystal Structures of // *Inorg. Chem. American Chemical Society.* 1989. V. 28. № 23. P. 4279–4284.
34. *Brachvogel R.C., Maid H., von Delius M.* NMR Studies on  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  complexes of orthoester cryptand 0-Me<sub>2</sub>-1.1.1 // *Int. J. Mol. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.* 2015. V. 16. № 9. P. 20641–20656.
35. *Formica M. et al.* Cryptand ligands for selective lithium coordination // *Coord. Chem. Rev. Elsevier.* 1999. V. 184. № 1. P. 347–363.
36. *Sliwa W., Girek T.* Calixarene complexes with metal ions // *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem. Springer.* 2010. V. 66. № 1. P. 15–41.
37. *He Q. et al.* Selective Solid–Liquid and Liquid–Liquid Extraction of Lithium Chloride Using Strapped Calix[4]pyrroles // *Angew. Chemie – Int. Ed. Wiley-VCH Verlag.* 2018. V. 57. № 37. P. 11924–11928.
38. *Sun H., Tabata M.* Separation and transport of lithium of 10<sup>−5</sup> m in the presence of sodium chloride higher than 0.1 M by 2,3,7,8,12,13,17,18-octabromo-5,10,15,20-tetrakis(4-sulfonatophenyl)porphyrin // *Talanta. Elsevier.* 1999. V. 49. № 3. P. 603–610.
39. *Cram D.J.* Preorganization—From Solvents to Spherands // *Angew. Chemie Int. Ed. English. John Wiley & Sons, Ltd.* 1986. V. 25. № 12. P. 1039–1057.
40. *Katsuta S. et al.* Selective extraction of lithium with a macrocyclic trinuclear complex of (1,3,5-trimethylbenzene)ruthenium(II) bridged by 2,3-dioxopyridine // *Anal. Sci. The Japan Society for Analytical Chemistry.* 2008. V. 24. № 10. P. 1215–1217.
41. *Ivanova I.S., Tsivadze A.Y. et al.* 2,4,6-Tris[2-(diphenylphosphoryl)-4-ethylphenoxy]-1,3,5-triazine: A new ligand for lithium binding // *Inorganica Chim. Acta. Elsevier.* 2019. V. 497. Article number 119095.
42. *Solov'ev V., Baulin D., Tsivadze A.* Design of phosphoryl containing podands with  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  selectivity using machine learning // *SAR QSAR Environ. Res. Taylor and Francis Ltd.* 2021. V. 32. № 7. P. 521–539.
43. *Kireeva N., Baulin V.E., Tsivadze A.Y.* A Machine Learning-Based Study of  $\text{Li}^+$  and  $\text{Na}^+$  Metal Complexation with Phosphoryl-Containing Ligands for the Selective Extraction of  $\text{Li}^+$  from Brine // *ChemEngineering.* 2023. V. 7. № 3. Article number 41.
44. *Цивадзе А.Ю., Варнек А.А., Хуторский В.Е.* Координационные соединения металлов с краун-лигандами. М.: Наука, 1991.
45. *Pranolo Y., Zhu Z., Cheng C.Y.* Separation of lithium from sodium in chloride solutions using SSX systems with LIX 54 and Cyanex 923 // *Hydrometallurgy. Elsevier.* 2015. V. 154. P. 33–39.
46. *Harvianto G.R., Kim S.H., Ju C.S.* Solvent extraction and stripping of lithium ion from aqueous solution and its application to seawater // *Rare Met. Springer.* 2016. V. 35. № 12. P. 948–953.
47. *Zhang L. et al.* Lithium recovery from effluent of spent lithium battery recycling process using solvent extraction // *J. Hazard. Mater. Elsevier.* 2020. V. 398. Article number 122840.
48. *Zhang L.* Method for extracting and separating lithium and alkaline earth metal from salt lake brine with high sodium-lithium ratio: pat. CN113981243A USA. China, 2021.
49. *Li Z., Binnemans K.* Selective removal of magnesium from lithium-rich brine for lithium purification by synergic solvent extraction using  $\beta$ -diketones and Cyanex 923 // *AIChE J. John Wiley and Sons Inc.* 2020. V. 66. № 7. Article number 16246.
50. *Çelebi E.E.* A novel lithium phosphate production method by stripping of lithium from the lithium enolate in kerosene using orthophosphoric acid // *Hydrometallurgy.* 2022. V. 210. Article number 105860.
51. *Tsivadze A.Y. et al.* A New Extraction System Based on Isopropyl Salicylate and Trioctylphosphine Oxide for Separating Alkali Metals // *Molecules.* 2022. V. 27. № 10. P. 3051.
52. *Bezdomnikov A.A., Tsivadze A.Y. et al.* Liquid extraction of lithium using a mixture of alkyl salicylate and tri-n-octylphosphine oxide // *Sep. Purif. Technol.* 2023. V. 320. Article number 124137.
53. *Pearson R.G., Songstad J.* Application of the Principle of Hard and Soft Acids and Bases to Organic Chemistry // *J. Am. Chem. Soc. American Chemical Society.* 1967. V. 89. № 8. P. 1827–1836.
54. Пат. 2784157 Российская Федерация, МПК C22B 26/12 (2006.01). Способ селективного экстракционного извлечения лития из водного щелочного раствора, содержащего хлориды лития, натрия, калия и гидроксид натрия / А.А. Бездомников; заявитель и патентообладатель ИФХЭ РАН. № 2022115330; заявл. 07.06.2022; опубл. 23.11.2022 Бюл. № 33.

## ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИИ С УЧЁТОМ СОСТОЯНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ

© 2023 г. Л. И. Леонтьев<sup>а,\*</sup>, О. В. Заякин<sup>б,\*\*</sup>, А. И. Волков<sup>с,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Российская академия наук, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>с</sup>ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва, Россия

\*E-mail: leo@presidium.ras.ru

\*\*E-mail: zferro@mail.ru

\*\*\*E-mail: rhenium@list.ru

Поступила в редакцию 11.06.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

В статье приведены данные по объёмам импортируемых и экспортируемых материалов металлургической отрасли России. Отечественная промышленность, несмотря на богатую минерально-сырьевую базу, по целому перечню рудных концентратов, оксидов и других соединений, металлов и ферросплавов, а также по отдельным маркам стали и металлическим изделиям зависит от импортных поставок, что приводит к высоким рискам в сфере безопасности и устойчивого развития государства в целом. Авторами проанализирована ситуация, связанная с зависимостью от поставок из-за рубежа рудных материалов, металлов и сплавов, приведены примеры перспективных технологических вариантов развития отечественного производства с использованием собственной минерально-сырьевой базы.

**Ключевые слова:** металлургия, минерально-сырьевая база, металлы, сплавы, импорт, экспорт, технология производства, сталь, легирование.

DOI: 10.31857/S086958732307006X, EDN: RQPSGG

Россия, несмотря на наличие богатой минерально-сырьевой базы [1], по целому перечню рудных концентратов, оксидов и других соединений, металлов и ферросплавов, а также по отдельным маркам стали и металлическим изделиям зависит от импортных поставок. В силу большого объёма производства эта зависимость особенно

заметна в чёрной металлургии, являющейся основным потребителем ряда цветных, в том числе редких, металлов, используемых для раскисления, легирования и модифицирования структуры чугуна и стали. Сплавы железа составляют основу конструкционных материалов для объектов инфраструктуры, зданий, сооружений, транспорта,



ЛЕОНТЬЕВ Леопольд Игоревич — академик РАН, советник президиума РАН. ЗАЯКИН Олег Вадимович — член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, главный научный сотрудник ИМЕТ УрО РАН. ВОЛКОВ Антон Иванович — кандидат химических наук, директор научного центра комплексной переработки сырья им. Н.П. Лякишева ЦНИИчермет им. И.П. Бардина.

машино- и станкостроения, химической промышленности, оборонной отрасли. Поэтому зависимость от того или иного вида сырья приводит к высоким рискам в сфере безопасности и устойчивого развития государства в целом.

В таблице 1 представлена доля импорта в объёме потребления ряда материалов, поставки которых в значительной степени зависят от зарубежных производителей [2]. Для некоторых материалов (вольфрамовый концентрат, пигментный диоксид титана, ферромолибден) в силу дальних расстояний между поставщиками и потребителями сложилась ситуация, при которой отечественное сырьё отправляется на экспорт, при этом российские потребители вынуждены приобретать аналогичное импортное. Для ряда материалов (пентаоксид ванадия, циркониевый концентрат) такая ситуация обусловлена разницей в стоимости и качестве отечественной и зарубежной продукции.

Вынуждены констатировать, что по целому спектру материалов в России производится продукция первых переделов, которая отправляется на экспорт, перерабатывается за рубежом, а затем поступает обратно в виде продукции глубокой степени переработки или готовых изделий. Так, концентрат неразделённых редкоземельных металлов (РЗМ) поступает за рубеж, а по импорту мы получаем соединения, ряд индивидуальных РЗМ и готовые изделия (компоненты электроники, катализаторы, постоянные магниты, оптическое стекло, керамика, лигатуры и модификаторы, бытовая электронная техника, приборы и оборудование). Конвертерный шлак и технический пентаоксид ванадия частично поступают на экспорт, а по импорту Россия приобретает чистые пентаоксид и триоксид ванадия. Основная часть производимого феррохрома идёт на экспорт, а получаемые из него нержавеющая сталь и коррозионностойкие изделия приобретаются по импорту. Уникальный бадделеитовый концентрат практически полностью идёт на экспорт, а циркониевая керамика, огнеупоры, в том числе для вставок в стаканы разливки стали, и другие дорогостоящие изделия, например зубные протезы, импортируются. Основная часть ферромолибдена и ферровольфрама не находит спроса внутри России и отправляется на экспорт, в то же время мы наблюдаем большую зависимость от импортных поставок инструментальных быстрорежущих сталей, сталей для машиностроения, твёрдых сплавов, металлорежущего инструмента, в производстве которых используются вольфрам и молибден. Основная часть металлического титана, производимого в России, поступает зарубежным производителям самолётов (Boeing, Airbus). Подавляющее большинство российских гражданских авиалайнеров импортного производства (в лизинге).

Между тем по многим видам сырья в России имеется собственная сырьевая база. Недостаточность её использования обусловлена в ряде случаев низким качеством руд по сравнению с импортируемыми, отсутствием инфраструктуры и удалённостью месторождений.

**Марганец.** Марганец — один из важнейших компонентов сталей, причём как массовых, так и специальных. Он обеспечивает высокие потребительские свойства сплавов — повышенную прочность наряду с высокой пластичностью и вязкостью, низкий порог хладноломкости, немагнитность, оптимальный коэффициент теплового расширения, высокий уровень диссипативных свойств, способность к упрочнению и к формированию наноструктурированных композиций на поверхностях трения, обеспечивающих высокие трибологические свойства и низкий коэффициент трения при одновременном повышении износостойкости. Ситуация на рынке марганца целиком определяется уровнем его потребления в сталелитейном производстве [3]. Суммарный расход Mn при выплавке 1 т стали составляет около 10.4 кг.

Содержание марганца (%) в сталях различных марок

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Углеродистые                    | 0.5 |
| Конструкционные                 | 1.0 |
| Высокопрочные низколегированные | 1.5 |
| Немагнитные                     | 11  |
| Нержавеющие (серия 200)         | 12  |
| Сталь Гадфильда                 | 13  |

Марганец относится к группе полезных ископаемых, имеющих важное стратегическое значение, однако Россия вынуждена импортировать товарную марганцевую руду, ферросплавы, металлический марганец, электролитический диоксид марганца, перманганат калия [4–6]. Объём импорта марганцевого концентрата составляет 1.1 млн т. Более 90% Mn используется в чёрной металлургии при выплавке стали в качестве раскислителя и легирующего элемента. С появлением электропечей получило развитие производство ферросиликомарганца как более эффективного раскислителя стали за счёт повышенного содержания кремния.

Роль марганца как легирующего элемента резко возрастает с развитием сталеплавильных технологий (электросталеплавильное производство, внепечная обработка стали, вакуумирование). При этом роль раскислителей переходит к кремнию, алюминию, кальцию. Одновременно наблюдается тенденция к увеличению объёма выпуска низкоуглеродистых сталей, в связи с чем в

Таблица 1. Некоторые импортируемые и экспортируемые материалы

| Наименование материала                        | Доля импорта в потреблении, % | Доля экспорта от объёма производства, % |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Сырьевые материалы                            |                               |                                         |
| Марганцевый концентрат                        | 100                           | 0                                       |
| Диоксид марганца                              | 100                           | 0                                       |
| Хромовый концентрат                           | 32.8                          | 0.1                                     |
| Пентаоксид ванадия технический                | 0                             | 42.6                                    |
| Пентаоксид ванадия очищенный                  | 100                           | 0                                       |
| Ильменитовый концентрат                       | 97.2                          | 4.6                                     |
| Пигментный диоксид титана                     | 67.5                          | 51.1                                    |
| Вольфрамовый концентрат                       | 8.6                           | 56.9                                    |
| Молибденовый концентрат                       | 36.9                          | 0                                       |
| Оксиды молибдена очищенные                    | ~100                          | 0                                       |
| Ниобия пентаоксид                             | 27.4                          | 7.0                                     |
| Коллективный концентрат РЗМ                   | ~1.5                          | 98.2                                    |
| Соединения разделённых РЗМ                    | 87.1                          | 3.3                                     |
| Циркониевые концентраты ( $ZrSiO_4 + ZrO_2$ ) | 93.9                          | 96.0                                    |
| Циркония диоксид                              | 97.6                          | —                                       |
| Металлы, ферросплавы и лигатуры               |                               |                                         |
| Марганец металлический                        | 100                           | 0                                       |
| Марганец электролитический                    | 100                           | 0                                       |
| Ферромарганец низко- и среднеуглеродистый     | 100                           | 0                                       |
| Ферросиликомарганец                           | 33.5                          | 12.1                                    |
| Феррохром                                     | —                             | 83.0                                    |
| Хром металлический                            | —                             | 90.0                                    |
| Феррониобий                                   | 99.3                          | 44.0                                    |
| Феррованадий                                  | 2.5                           | 21.7                                    |
| Ферромolibден                                 | 61.4                          | 94.0                                    |
| Ферровольфрам                                 | 0                             | 66.3                                    |
| РЗМ в виде металлов                           | 100                           | 0                                       |
| Тантал металлический                          | 96.4                          | 4.5                                     |
| Висмут металлический                          | 100                           | 4.5                                     |
| Стали                                         |                               |                                         |
| Прокат из нержавеющей стали                   | 79.2                          | 13.2                                    |
| Трубы из нержавеющей стали                    | 59.0                          | —                                       |
| Инструментальные быстрорежущие стали          | до 100                        | —                                       |

Таблица 1. Окончание

| Наименование материала                                                                          | Доля импорта в потреблении, % | Доля экспорта от объёма производства, % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Машиностроительные (мартенситно-старееющие, подшипниковые, пружинные, высокопрочные, рельсовые) | до 70.5                       | 3.1                                     |
| Электротехническая сталь (прокат)                                                               | 6.5                           | 83.6                                    |
| Немагнитные стали, материалы для наплавки износостойкого покрытия                               | 90.0                          | —                                       |
| Биметаллический листовой прокат                                                                 | 90.0                          | —                                       |
| Толстолистовая легированная никелевая сталь для сосудов, работающих под давлением               | 75.0                          | —                                       |
| Легированная и коррозионностойкая сталь для эксплуатации при высокой температуре                | 90.0                          | —                                       |
| Сталь конструкционная криогенная                                                                | до 100                        | —                                       |

мире растёт спрос на металлический марганец и низкоуглеродистый ферромарганец [7].

В России ситуация с производством марганцевых ферросплавов за последние 15 лет изменилась в лучшую сторону, доля импорта в потреблении ферросиликомарганца снизилась с 80–90 до 40%; ферромарганца – с 40 до 13% (рис. 1). Не изменилась ситуация с металлическим марганцем, весь объём его потребления (свыше 60 тыс. т в год) покрывается за счёт импортных поставок.

Наша страна обладает крупной сырьевой базой марганцевых руд, входя в десятку мировых держателей их запасов, однако товарно-сырьевую продукцию не производит. В России промышленная добыча марганцевых руд не ведётся с 2013 г. С 2017 г. в стране проводится только их опытно-промышленная добыча; в 2020 г. её объёмы составили 188 тыс. т. Балансовые запасы марганцевых руд по состоянию на 01.01.2021 достигают 283.5 млн т, они заключены в недрах 27 месторождений, ещё на двух учтены только забалансовые запасы. В целом качество российских руд низкое: по содержанию марганца они относятся к бедным (среднее значение по месторождениям колеблется в пределах 6.6–31.1%), труднообогатимым, в них в значимом количестве содержатся вредные примеси (фосфор, железо, диоксид кремния). Основная часть запасов категорий А+В+С<sub>1</sub> (более 77.1%) заключена в месторождениях, сложенных карбонатными рудами, остальные – в объектах с окисленными (17.1%), смешанными (5.2%), оксидными (0.5%) рудами и в морских железомарганцевых конкрециях (0.1%). В связи с этим собственное производство марганцевых ферросплавов базируется на привозном сырье. Среди отечественных месторождений следует отметить прежде всего Усинское (Кемеровская область),

Порожнинское (Красноярский край), месторождения Урала, включая Полуночную группу (Свердловская область) и Парнокское месторождение (Республика Коми). Месторождения есть также в Алтайском крае, Архангельской, Иркутской и Оренбургской областях.

Отечественные руды имеют ряд особенностей по химическим и минералогическим характеристикам, что требует дополнительных научно-исследовательских работ, касающихся обогащения, подготовки к плавке и доработки технологических режимов производства сплавов [8]. К вопросу добычи и переработки марганцевых руд приступали неоднократно, однако до сих пор их добыча в России не осуществляется [9, 10]. В таблице 2 представлены проекты по организации марганцевого производства, действовавшие и планировавшиеся в последнее время. Как считают специалисты, убыточность планируемых проектов связана с их нацеленностью на получение традиционной многотоннажной товарной продукции (марганцевых ферросплавов), себестоимость которой оказывается выше, чем при переработке зарубежных богатых концентратов.

**Хром.** Основной сферой потребления хромовых руд выступает чёрная металлургия, где их используют для выплавки феррохрома. Феррохром, в свою очередь, служит легирующей добавкой при производстве сталей. Хром обладает высокими антикоррозионными свойствами и в качестве легирующего элемента входит в стали и сплавы многих марок. Содержание хрома в сталях в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований изменяется от десятых долей процента до 30–40%.

По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы хрома в России составили 51.8 млн т; они заклю-

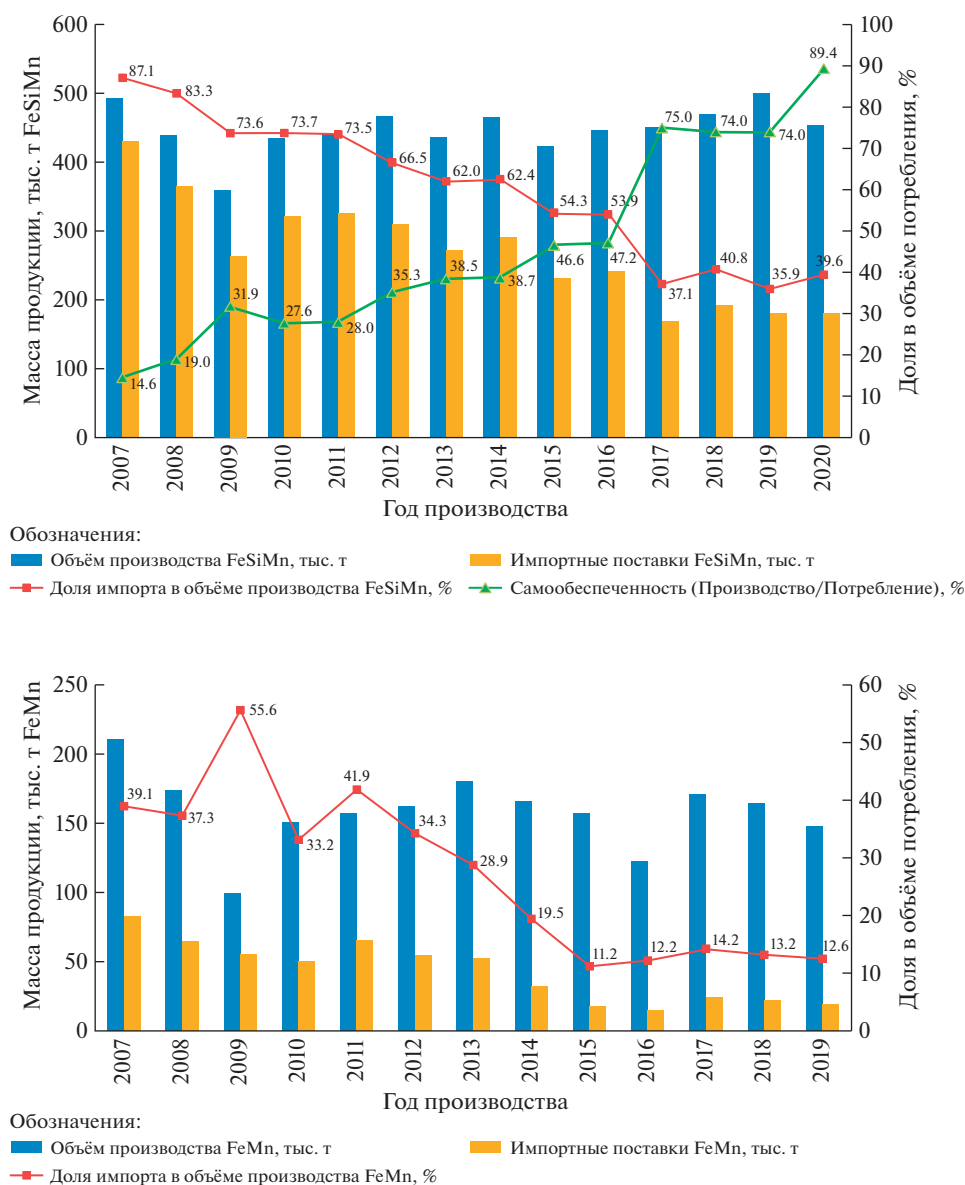


Рис. 1. Объёмы потребления и импортных поставок ферросиликомарганца и ферромарганца в России

чены в 33 коренных месторождениях и группе россыпей, учитываемых как единый объект. Качество российских хромовых руд низкое, по содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  они относятся к бедным (30–45%) и убогим (10–30%). В настоящее время отечественной промышленностью используются руды, не требующие обогащения, с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  более 35%, но только четверть российских запасов соответствует этому уровню. Основные объёмы хромовых руд – почти 70% запасов страны сосредоточены в Карело-Кольском регионе (Республика Карелия и Мурманская область), где находятся крупнейшие в России Аганозёрское и Сопчеозёрское месторождения [11].

Ситуацию с импортозависимостью российской металлургии от хромового сырья нельзя охарактеризовать как напряжённую ввиду устойчивых экономических связей России с Казахстаном и появлением нового импортного потока из Южно-Африканской республики. Кроме того, собственная минерально-сырьевая база хромитов достаточна, производственные мощности по их добыче только наращиваются.

Более 90% российской добычи хромовых руд осуществляют два недропользователя – АО «ЧЭМК» и АО «Сарановская шахта «Рудная»»; эти же компании владеют основным объёмом запасов хромитов. При этом АО «ЧЭМК» выступает управляющей компанией АО «Сарановская шахта

**Таблица 2.** Проекты по добыче и переработке марганцевых руд в России

| Месторождение                                 | Предприятие                                                        | Статус проекта                                                                                                                                     | Примечание                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Усинское                                      | ЧЕК-СУ.ВК                                                          | В 2015 г. реализация проекта приостановлена из-за прений о его экологической безопасности. Освоение отложено в 2017 г. Компания признана банкротом | Низкое содержание марганца (19%), повышенное содержание фосфора. Планировалось добывать до 1370 тыс. т руды в год. Мощность обоганительной фабрики 800 тыс. т по концентрату. Планируемое производство марганца металлического 80 тыс. т в год |
| Селезеньское                                  | Западно-Сибирский электро-металлургический завод                   | Проект добычи перепрофилирован на переработку древесины, сырьё для завода поступает из Африки                                                      | Добыто всего 8 тыс. т руды, далее руды не оказалось                                                                                                                                                                                            |
| Парнокское                                    | Челябинский электро-металлургический комбинат                      | Карьер законсервирован. Использование руды затруднено                                                                                              | Тяжёлые гидрогеологические условия болотистой местности и глинистый мелкодисперсный характер руды                                                                                                                                              |
| Южно-Хинганское                               | Хэмэн—Дальний Восток                                               | Эксплуатация не началась, сроки переносятся, проводятся исследования                                                                               | Мелкое по запасам, низкое содержание марганца (21%). Планировалось добывать до 150 тыс. т в год                                                                                                                                                |
| Железо-марганцевые конкреции Балтийского моря | Кингисеппский завод ферросплавов                                   | Проект закрыт, завода больше не существует                                                                                                         | Завод был перепрофилирован под производство ферромарганца, некоторое время работал на привозном сырье. Предполагалось получение оксидов марганца и металлического марганца из конкреций                                                        |
| Ниязгуловское 1                               | Уральское горно-рудное управление “Восток”                         | Промышленная добыча не ведётся. Проводятся подготовительные работы. Работает в опытном режиме                                                      | Проект был законсервирован в 1941 г. В 2008 г. вновь получена лицензия до 2022 г.                                                                                                                                                              |
| Громовское                                    | Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ППГХО) | ППГХО отказалось от расконсервации карьера. Громовский рудник на консервации                                                                       | ППГХО вело разработку месторождения в период с 2003 по 2012 г. Однако в связи с низким содержанием марганца (17%) в руде горнодобывающее предприятие законсервировано                                                                          |
| Порожинское                                   |                                                                    |                                                                                                                                                    | В малоосвоенном районе, высокое содержание фосфора. Низкое содержание марганца (19%)                                                                                                                                                           |
| Сейбинское                                    | ГК “Георгиевский рудник”                                           | Изучение технологических свойств руды, схемы переработки, подсчёт запасов                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                |
| Тынынское                                     | Североуральская марганцевая компания                               | Готовится расконсервация карьера                                                                                                                   | Планируется добыть остаточные запасы месторождения (407 тыс. т) в течение трёх лет до 2027 г. Содержание марганца 20%                                                                                                                          |

Таблица 2. Окончание

| Месторождение                                                     | Предприятие          | Статус проекта                                                                                                                                         | Примечание                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дурновское                                                        | “Недра Сибири”       | Работы прекращены из-за недостатка средств и трудностей по доразведке                                                                                  | Сложная структура рудных тел. Мелкое по запасам. Содержание марганца до 23%                                                                                                     |
| Николаевское                                                      | “Иркутский марганец” | Добыча не ведётся. Ранее проводились поисковые работы, ведётся поиск финансирования                                                                    | В 2017 г. лицензия аннулирована                                                                                                                                                 |
| Участок Марганцевый в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края | “Транссервис”        | В 2016 г. планировалось проведение ГРП с выявлением мелкого месторождения марганцевых руд                                                              |                                                                                                                                                                                 |
|                                                                   | “Запсибруда”         | В 2017 г. утверждён проект на проведение поисков марганцевых руд и попутных полезных ископаемых на Мунжинской площади в пределах лицензионного участка | ООО “Запсибруда” владеет лицензией на геологическое изучение и добычу марганцевых руд в юго-западной части Горной Шории на территории Таштагольского района Кемеровской области |
|                                                                   | “Сибзолоторазведка”  | В 2017 г. планировалось начало ГРП по проекту оценочных работ на марганцевые руды на Клевакинском участке в Свердловской области                       |                                                                                                                                                                                 |
| Мазульское                                                        |                      | В настоящее время не эксплуатируется; карьер законсервирован                                                                                           |                                                                                                                                                                                 |

“Рудная”» и ООО “Западно-Уральский хром”, являясь фактически монополистом хроморудной промышленности России.

В настоящее время в нашей стране выплавляют феррохром различных марок (~400 тыс. т), ферросиликохром товарный (~70 тыс. т) и передельный [12–16]. Ввиду небольших мощностей по производству нержавеющей стали существенная доля выпускаемого феррохрома поступает на экспорт (рис. 2). Россия занимает около половины мировых мощностей производства хрома металлического, входит в число мировых лидеров по производству низкоуглеродистого феррохрома.

Хромовые ферросплавы в основном используются при получении коррозионностойкой стали. Современный российский рынок металлургической продукции из нержавеющей стали характеризуется высокой зависимостью от импорта. В последние десять лет доля импорта в объёме потребления проката из нержавеющей стали составляла 55–80%, для труб из нержавеющей стали колебалась в пределах 37–70%. Так, в 2021 г. из 534 тыс. т потреблённого готового проката

423 тыс. т было поставлено по импорту, а из 104 тыс. т труб – 39 тыс. т.

За последние три десятилетия в России резко упало производство нержавеющей стали (с 826 до 200 тыс. т). Одна из причин отказа от выпуска отечественной коррозионностойкой стали – отсутствие качественного хромового сырья для получения низкоуглеродистого высокопроцентного феррохрома, который в соответствии с принятой технологией служит основным компонентом производства нержавеющей стали. Более 2/3 выплавляемого в России феррохрома имеет высокое содержание углерода. В этой связи необходимо отметить, что в настоящее время в мире широко используются технологические схемы с применением высокоуглеродистого феррохрома, например аргоно-кислородный процесс. Уже есть готовые отечественные технологии производства ферроникеля из местных окисленных никелевых руд со средним содержанием Ni~1.1%. При использовании этих ресурсов возможно организовать производство нержавеющей стали на основе аргоно-кислородного процесса. Ещё один вариант – проект получения феррохрома и нержавеющей



Рис. 2. Объем производства и экспортных поставок феррохрома в России

щей стали на базе энергетических мощностей Кольской АЭС.

В г. Волжском Волгоградской области в 2023 г. начато строительство комплекса “Русской нержавеющей компании” по производству плоского нержавеющей проката, совместного предприятия Трубной металлургической компании и Челябинского электрометаллургического комбината. Предполагаемая мощность — до 500 тыс. т проката в год. Строительство цеха холодной прокатки планируется завершить в 2025 г., а цехов горячей прокатки и сталеплавильного — в 2026 г.

**Титан.** Занимая одно из первых мест в мире по запасам титаносодержащего сырья (15% мировых), Россия почти не использует его для производства ценнейших продуктов — металлического титана и его диоксида. По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы составили 606.9 млн т  $\text{TiO}_2$ , они заключены в 18 коренных (97% запасов) и 15 россыпных месторождениях, ещё два коренных и два россыпных содержат только забалансовые запасы.

Крупнейшие в стране запасы титана (48%) сосредоточены в Республике Коми, где они заключены в двух месторождениях: Ярегском нефтетитановом, руды которого (лейкоксен-кварцевые нефтеносные песчаники) богаты по содержанию  $\text{TiO}_2$  (10.44%), но весьма труднообогащаемы, и Пижемском с менее богатыми (4.27%  $\text{TiO}_2$ ) цирконильменит-лейкоксеновыми рудами. На долю Мурманской области приходится 20.5% запасов страны, где они сосредоточены в магматогенных месторождениях. В их рудах, связанных со щелочными породами (Хибинская группа и Ловозёрское), титан присутствует как попутный компонент, в рудах месторождения Юго-Восточная Гремяха, связанного с габброидами, как основ-

ной. В магматогенных месторождениях Забайкальского края (титаномagnetитовое Чинейское и апатит-ильменит-титаномagnetитовое Кручининское) сосредоточено 18.1% российских запасов. Аналогичные объекты формируют сырьевую базу Челябинской (5% запасов России, Медведёвское месторождение ильменит-титаномagnetитовых труднообогащаемых руд) и Амурской (3.7%, месторождение Большой Сэйим ильменит-титаномagnetитовых сравнительно легкообогащаемых руд) областей, а также Красноярского края (0.7%, титаномagnetитовые месторождения Подлысанской группы). Запасы Иркутской области (1% запасов страны) сосредоточены в слабосцементированных ильменитсодержащих песчаниках Тулунского месторождения.

Во всех остальных регионах России запасы титана связаны с россыпными месторождениями. Самые крупные из них — циркон-рутил-ильменитовые прибрежно-морские россыпи Центрального месторождения в Тамбовской области (1.1% запасов страны) и Туганского в Томской области (0.4%).

Освоенность российской сырьевой базы титана невысокая, в 2020 г. в разработку было вовлечено только 6% запасов, причём с извлечением этого металла в концентрат — всего 0.1%. Подготавливалось к освоению и разведывалось 27.3%, в нераспределённом фонде оставалось 66.7% запасов.

Единственным действующим источником титанового сырья в России служит Ловозёрское месторождение, при переработке руды которого на Соликамском магниевом заводе получают лопаритовый концентрат, а из него, в свою очередь, около 2.2 тыс. губчатого титана. В 2016 г. из-за

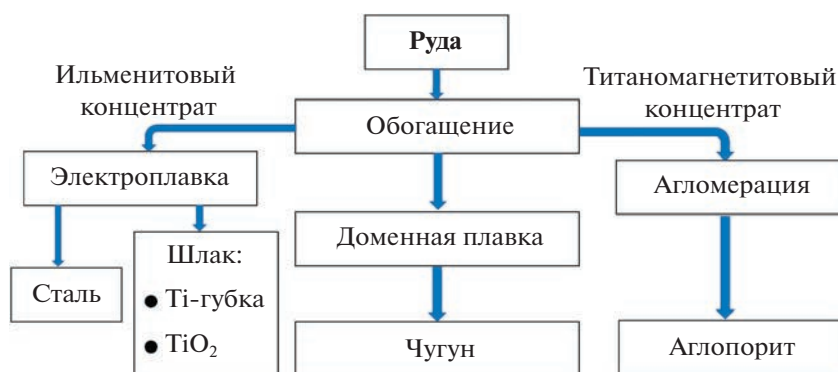


Рис. 3. Принципиальная схема переработки руды Медведёвского месторождения

неблагоприятной рыночной конъюнктуры и технологических трудностей законсервирован Олекминский рудник и горно-обогатительный комбинат, разрабатывавший Куранахское месторождение. В 2022 г. планировали начать получение концентрата на месторождении Большой Сейим. В марте 2023 г. производственные мощности по добыче руды на Куранахском месторождении были восстановлены. Планируемый объём производства — 300–400 тыс. т ильменитового концентрата в год. В опытном режиме работает Туганский ГОК “Ильменит”, опытные партии ильменитового концентрата прошли технологические испытания для производства губчатого титана ВСМПО–АВИСМА. Рутитовый и лейкоксеновый концентраты применяют для получения сварочных электродов и проволоки.

В России сложилась парадоксальная ситуация: обладая большими запасами титана, страна закрывает значительную (97,4%) часть своих потребностей за счёт импортного сырья. Металлический титан производился ВМПО–АВИСМА в основном из украинского сырья (88% Вольногорский ГОК, Днепропетровская область). В случае отказа Украины сырьё приобретает в Индии, Австралии и других странах.

Пигментный диоксид титана до 2014 г. в России вообще не производился, а закупался на Украине, в Германии, Финляндии, Бельгии, Китае и других странах. Он используется в лакокрасочной промышленности, производстве пластмасс, бумаги, искусственных волокон, резины, катализаторов.

Импорт титановых концентратов в 2019 г. составил 304,5 тыс. т, а пигментного диоксида титана 53,6 тыс. т. В связи с этим разработка отечественных месторождений становится актуальной задачей [17–21].

ЗАО “Титановые инвестиции” — крупнейшее химическое предприятие Крыма функционирует с 1970 г. Главное направление его деятельности — производство пигментного  $\text{TiO}_2$ . Среди попутных

продуктов — выпуск аммофоса и железного купороса, красного железистоокисного пигмента, используемого для изготовления красок и эмалей. На предприятии применяется сернокислотный способ переработки титановых концентратов (перовскитовые, сфеновые, ильменитовые концентраты и титановые шлаки). Предприятие работает на привозном сырье. Например, ильменитовые концентраты завозили с севера Украины. Продолжается их поступление из Канады, Норвегии и Австралии.

По данным Крымского гидрометцентра, в районе г. Армянска, в котором расположен завод “Титан”, концентрации загрязнителей в атмосферном воздухе существенно превышают ПДК. Ежегодно образуются тысячи тонн газообразных отходов, золы и пыли, в том числе около 4 тыс. т твёрдых отходов в виде тончайших аэрозолей (диоксид титана, ильменит, аммофос, железный купорос, красный пигмент железистоокисный и др.). Промышленные стоки предприятия отводятся в кислотонакопитель-испаритель, который представляет собой отштурованный дамбой залив озера Сиваш. Среднее значение pH жидких промстоков, направляемых в кислотонакопитель, составляет 1,10–1,15, что свидетельствует об агрессивной кислотной среде. В связи с этим актуальной остаётся задача переработки ильменитовых и титаномагнетитовых концентратов по другой, наиболее эффективной и экологически безопасной технологии, позволяющей получать титановый шлак, чугун, ферротитан.

Ярегское нефтетитановое месторождение находится в Республике Коми. Руда содержит 58–73% кварца, 15–20% лейкоксена ( $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ), 8–10% высоковязкой нефти. Общее количество  $\text{TiO}_2$  в месторождении — 278,6 млн т. Разработкой технологической схемы переработки этих руд занимались ОАО “Ярега-Руда”, ИМЕТ УрО РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН и др. Показана возможность переработки лейкоксеновых концен-

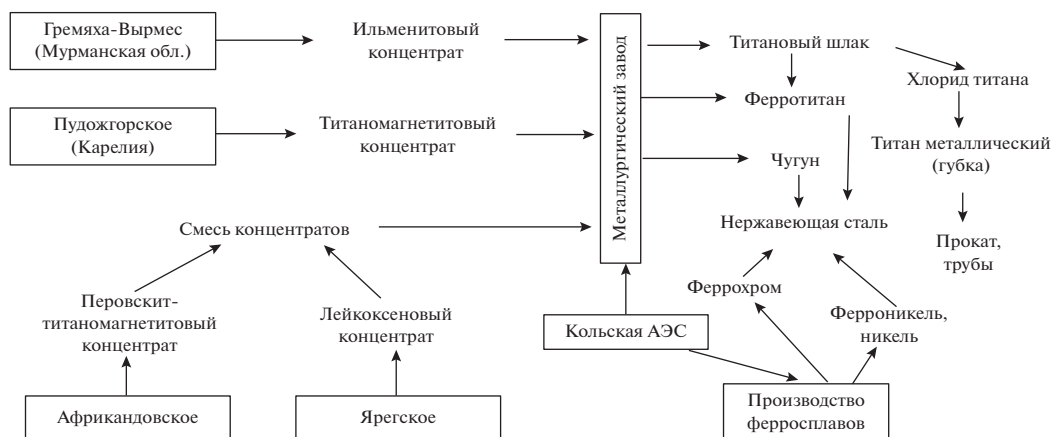


Рис. 4. Предлагаемая схема переработки титановых концентратов

тратов, полученных из руды по сульфатной и хлоридной технологиям.

Медведёвское месторождение ильменит-титаномагнетитовых руд расположено в Челябинской области, в 10 км от города Златоуста. В 1960–1970-е годы эти руды предполагалось использовать в качестве основного источника обеспечения сырьём титаново-пигментной промышленности, были проложены железная дорога и высоковольтная линия. Златоустовское обогатительное рудоуправление в составе обогатительной фабрики и аглофабрики, работавшее ранее на Кусинских рудах, должно было обеспечить первичную переработку руды с получением ильменитового и титаномагнетитовых концентратов, которые далее планировалось перерабатывать по схеме (рис. 3). Агломерат по железной дороге Бакал–Чусовая предполагалось отправлять на Чусовской металлургический завод для доменной плавки с получением ванадистого чугуна, а ильменитовый концентрат – той же дорогой в г. Березники на электроплавку для получения высокотитанового шлака, из которого планировалось производство титановой губки и пигментного диоксида. Позже разработка схемы была переориентирована на Копанское, более крупное месторождение, расположенное на западном склоне Южного Урала в пределах Челябинской области на территории Златоустовского и Саткинского районов. Запасы Копанского месторождения значительны – более 2 млрд т. Технология их переработки аналогична Медведёвским рудам.

К Копанскому месторождению приурочено месторождение титаносодержащих песков в бассейне реки Ай – притока Уфы. ООО “Уралтитан-93” с участием АО “Гиредмет” госкорпорации “Росатом” и ИМЕТ УрО РАН предложены технологии добычи, обогащения и металлургической переработки песков с получением высокотитанистого шлака и ванадистого металла. В

частности, предусмотрено строительство карьера и получение ильменитового концентрата на базе мобильного обогатительного комплекса. Концентрат может быть товарной продукцией, но целесообразнее его перерабатывать на высокотитанистый шлак, например, на Златоустовском металлургическом заводе в рудотермических электропечах или Березниковском металлургическом комбинате, где плавится импортный концентрат.

Один из вариантов развития титановой отрасли предусматривает создания металлургического производства на базе энергетических мощностей Кольской АЭС (рис. 4). Реализация совместной плавки лейкоксенового и перовскит-титаномагнетитового концентратов позволит:

- 1) снизить радиоактивность концентрата до безопасного уровня;
- 2) использовать отечественное сырьё;
- 3) создать металлургический кластер с получением продукции глубокой степени переработки, в том числе проката нержавеющей стали, пигментного диоксида титана, изделий из титана, оксидов и солей редких металлов;
- 4) снизить риски сырьевой импортозависимости;
- 5) снизить на 7.5% себестоимость пигментного диоксида титана в связи с отсутствием в лейкоксеновых концентратах железа и соответствующим уменьшением расхода серной кислоты на вскрытие.

**Ниобий.** Ниобий в виде феррониобия (содержит 50–65% Nb) применяется для производства жаропрочных сталей в авиации, нержавеющей низколегированных сталей в машиностроении, судостроении, трубной промышленности (на эти цели идёт около 85% мирового потребления, 93% российского). Применение ниобия в низколегированных сталях повышает их прочность на 20%, использование таких сталей для газопровод-

**Таблица 3.** Содержание ниобия в сталях разных марок

| Вид стали               | Марка            | Содержание Nb, % |
|-------------------------|------------------|------------------|
| Трубы большого диаметра | X 80             | 0.05             |
| Стали для судостроения  | EN 36 normalized | 0.03             |
| Конструкционные стали   | S 355 MC         | 0.03             |
| Автомобильные полосы    | S 500 MC         | 0.04             |
| Автомобильный лист      | H 340 LA         | 0.04             |
| Жаростойкие стали       | 1.4509           | 0.60             |

ных труб большого диаметра в 1.5 раза увеличивает их производительность, значительно снижает расходы при эксплуатации. Содержание ниобия в сталях представлено в таблице 3.

Единственный отечественный источник сырья — пентаоксид ниобия Соликамского магниевого завода (617 т в 2020 г.), получаемый из лопаритового концентрата Ловозёрского горно-обогатительного комбината, выпускается в недостаточном количестве [22–26]. Пентаоксид ниобия высокого качества используется в производстве металлического ниобия и ниобиевых лигатур для спецсплавов. По нашей оценке, объём выпуска металлического ниобия составляет от 30 до 50 т в год, а ниобиевых лигатур (NiNb, NbAl, NbCr, NbWMoZr) — около 390 т в год в пересчёте на чистый ниобий. С 1997 г. потребление ниобия в чёрной металлургии России возросло почти в 40 раз [27]. В 2021 г. импортировано 2120 т этого металла в виде феррониобия, отечественная чёрная металлургия практически полностью зависит от его поставок из-за рубежа (в среднем 99% объёма потребления).

Возможности наращивания объёма действующего производства пентаоксида ниобия на Соликамском магниевом заводе ограничены. Мощности по переработке лопаритового концентрата составляют до 13 тыс. т в год, с производством соединений ниобия — до 855 т в пересчёте на пентаоксид ниобия ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ). Проблемы на действующей шахте Карнасурт связаны с истощением запасов богатой руды. Вторая шахта Умбозеро затоплена, необходимо восстановление инфраструктуры.

АО «Атомредметзолото» (горнорудный дивизион госкорпорации «Росатом») в 2020 г. был разработан проект модернизации и наращивания мощностей Ловозёрского ГОКа. В результате его реализации планируется довести переработку лопаритового концентрата до 24 тыс. т в год, объёмы производства пентаоксида ниобия до 1700 т.

В настоящее время проводятся геолого-разведочные работы перовскит-редкометалльного месторождения Африканда. По проекту АО «Арк-

минерал-Ресурс» проект планируется реализовать в два этапа: первый — создание горно-обогатительного комбината, второй — химико-металлургического комплекса. Мощность предполагаемого производства по оксидам ниобия и тантала составит 1030 т. Планируемый ввод в эксплуатацию — 2025 г.

Татарское месторождение разрабатывалось в 2002–2013 гг. ОАО «Стальмаг» с получением из фосфат-ниобиевой руды чернового концентрата. На Вишнёвогорской обогатительной фабрике из него производили пироксидный концентрат, из которого выплавляли феррониобий для нужд компании «Северсталь». Годовая производительность — 168 т Nb в феррониобии. Вскоре богатая руда была исчерпана, возникла необходимость финансирования проекта с совершенствованием технологии обогащения. В 2010 г. компания «Северсталь» приняла решение приостановить производство на «Стальмаг». В настоящее время ООО «Русская ниобиевая компания» планирует возобновить работы на месторождении. Учитывая, что Татарское месторождение относится к мелким, не следует ожидать, что его разработка позволит удовлетворить существенную часть спроса отечественной металлургической промышленности.

Уникальна по запасам и содержанию ниобия руда Томторского месторождения в Якутии. В 2014 г. лицензию на разведку и добычу полезных ископаемых (участок Буранный) получила компания ООО «Восток Инжиниринг», в настоящее время готовится промышленное освоение месторождения. Участки Северный и Южный находятся в нераспределённом фонде. Освоение Томторского редкометалльного месторождения планируется реализовать в следующие расчётные сроки: 2027 г. (ранее 2024 г.) — проектирование и строительство, ввод в эксплуатацию; 2028 г. (ранее 2026 г.) — выход на проектную мощность 10 тыс. т феррониобия в год.

Лицензией на разведку и добычу редких металлов и попутных компонентов Зашихинского месторождения до 2025 г. обладает ЗАО «Техно-

инвест Альянс”. Партнёром и акционером компании выступает ПАО “Челябинский трубопрокатный завод” — один из крупнейших отечественных производителей трубной продукции (общая доля рынка около 20%). Планируемый годовой объём производства пентаоксида ниобия: 2099 т (99.8%)  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ; 109 т (99.99%)  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Строительство ГМК на базе Зашихинского редкометалльного месторождения в Иркутской области планируется реализовать в следующие расчётные сроки: 2024 г. (ранее 2023 г.) — строительство ГОКа, объектов инфраструктуры и химико-металлургического завода в городе Краснокаменске; 2025 г. (ранее 2024 г.) — ввод в эксплуатацию и выход на проектную мощность по выпуску оксида тантала, оксида ниобия, феррониобия, цирконового концентрата, концентрата оксидов редкоземельных металлов.

Таким образом, существующие максимальные мощности производства пентаоксида ниобия не могут удовлетворить потребности в сырье для производства феррониобия. К тому же производимый по хлорной технологии оксид имеет высокую себестоимость, поэтому применяется для получения более дорогостоящих изделий (ниобий металлический, лигатуры и т.д.). Реализация планируемого расширения действующего производства на рудах Ловозёрского месторождения, в том числе организация производства переработки концентрата на Чепецком заводе, также не позволят достичь этой цели. Из наиболее проработанных проектов — организация переработки руды Томторского месторождения. Такая мера способна покрыть внутренние потребности отечественной металлургии в феррониобии.

**Вольфрам.** Вольфрам используется в качестве легирующей добавки в твёрдых и жаропрочных сталях, кислотоупорных и специальных сплавах, в электротехнике, химической промышленности. Из сплавов вольфрама изготавливают детали для машино- и авиастроения, он является обязательной составляющей инструментальной стали. Доля вольфрама, потребляемого в чёрной металлургии, составляет 65% общероссийского объёма потребления.

На российском рынке наблюдается отсутствие эффективной кооперации переработчиков вольфрамового сырья и производителей товарных продуктов, вследствие этого объём экспортируемого концентрата почти в 1.5 раза превышает объём импортируемого. Это обусловлено географическим положением добытчиков сырья и его переработчиков. Ожидается, что в ближайшее десятилетие будут исчерпаны запасы месторождений Приморского края, основного региона России по добыче вольфрама. В настоящее время прорабатывается проект возрождения Тырныаузского горно-обогатительного комбината. Плани-

руемая мощность рудника составляет 1.5 млн т в год. В г. Невинномысске предусмотрено строительство гидрометаллургического завода мощностью 5 тыс. т по оксиду вольфрама и 1.5 тыс. т оксида молибдена в год.

**Молибден.** До 80% вырабатываемого молибдена используется в чёрной металлургии для легирования стали и чугуна, которые применяются в авиационной и автомобильной промышленности для изготовления сильнонагруженных деталей, эксплуатируемых при высоких температурах. Молибден используют в низколегированных конструкционных (до 0.5% Mo), инструментальных (1.0–1.5%), нержавеющей хромоникелевых (2–4%) и быстрорежущих (7.5–8.5% Mo, вместо вольфрама) сталях.

Добычу молибдена в России осуществляет одно предприятие (Сорский ГОК). Ввиду сложного состава руд освоение месторождений напрямую зависит от уровня мировых цен на молибден, а они в последние годы настолько низки, что были законсервированы не только проекты освоения новых месторождений, но и действующий Жирекенский ГОК. В то же время российские предприятия по производству ферромolibдена, не имеющие собственной сырьевой базы, испытывают дефицит сырья и вынуждены ежегодно импортировать 3.0–3.3 тыс. т молибденового концентрата, что составляет 45–55% объёма его потребления.

На внутреннем рынке реализуется менее 20% ферромolibдена. Основная проблема производства молибдена в России связана с его низким потреблением в чёрной металлургии из-за недостаточного развития производства инструментальных, нержавеющей, быстрорежущих, конструкционных сталей.

**Ванадий.** Основным потребителем — чёрная металлургия, которая использует около 95% всего производимого ванадия [28–30]. Роль его как легирующего элемента в сталях весьма велика — около 50% выпускаемых легированных сталей содержат присадку ванадия [31, 32]. Ванадиевые конструкционные стали широко используют в авто- и авиастроении, железнодорожном транспорте, машиностроении. Инструментальные стали содержат от 0.2 до 2.6% V. Присадка 1% V к быстрорежущим сталям повышает эффективность резания и сверления инструментами примерно в 2 раза. Ванадий используют также для легирования чугуна. В машиностроении применяют чугуны с присадкой 0.10–0.35% V для изготовления паровых цилиндров, поршневых колец и золотников паровых машин, изложниц, прокатных валков, матриц для холодной штамповки.

Объём производства феррованадия в России составляет 3.7 тыс. т в год в пересчёте на ванадий,

видимое потребление — около 3 тыс. т в год. Избыток феррованадия, пентаоксида ванадия и шлака экспортируется. После попытки реконструкции Чусовского металлургического завода последний потерял возможность перерабатывать титаномагнетитовые концентраты — основное сырьё для получения ванадиевого конвертерного шлака. В этой связи актуальна организация переработки других видов сырья на мощностях ферросплавного цеха. Альтернативными источниками ванадия оказываются золы от сжигания тяжёлых фракций нефти, отработанные катализаторы, отвальные шламы и т.д. Важная задача — организация производства очищенного пентаоксида ванадия, применяемого для сплавов титана в химической промышленности. Для получения металлического ванадия и лигатур на его основе актуальна задача получения триоксида ванадия  $V_2O_3$ . В настоящее время указанные оксиды поступают из-за рубежа в объёме от 1 до 3,5 тыс. т в год.

**Редкоземельные металлы.** При запасах около 20% мировых Россия добывает и перерабатывает всего около 1% своих редкоземельных металлов (РЗМ). Основная часть представлена коллективным концентратом карбонатов РЗМ. Всего 5,6% добываемых редкоземельных металлов разделяют с получением соединений индивидуальных “лёгких” РЗМ, при этом соединения “тяжёлых” РЗМ не производят. До 95% получаемых в России коллективных концентратов РЗМ отправляют за рубеж, где проводят разделение. Ежегодно свыше 1000 т оксидов РЗМ после переработки (разделённых и частично разделённых) и около 100 т в виде металлов и сплавов Россия импортирует.

Ввод новых мощностей по добыче РЗМ не имеет смысла без создания новых отраслей промышленности, ориентированных на их потребление, в том числе в металлургии.

Объём потребления РЗМ в России составляет 1230 т, из них 120 т — в металлургии. Чаще всего эти металлы применяют в производстве высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита. Наиболее массовая сталь с РЗМ используется для трубной заготовки, на втором месте — рельсовая. Доля стали с РЗМ не превышает 1% её суммарного объёма.

Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии импортируются (мишметалл, ферросплавы и чистые металлы). Вопрос импортозамещения на отечественном рынке сырьевых материалов с РЗМ для металлургии остаётся нерешённой актуальной задачей [33–35]. Организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых

РЗМ. Пока же стоимость продукции с РЗМ отечественных предприятий очень высока.

Несмотря на существенный рост потребления РЗМ в металлургии, объём внутреннего рынка остаётся небольшим. Увеличения потребления РЗМ следует ожидать после решения вопроса импортозамещения и расширения производства высокопрочного чугуна, специальных сталей и сплавов, а также товаров на их основе.

**О создании горно-металлургического комплекса в Мурманской области.** В Мурманской области сложилась тупиковая ситуация с реализацией электроэнергии. Кольская АЭС производит большое количество электроэнергии, но обеспечивает ею только населённые пункты и АО “Кольская ГМК”. В то же время в регионе есть уникальные месторождения полезных ископаемых, организация переработки которых может гарантировать устойчивый рост потребления электроэнергии в крупных масштабах и производство высоколиквидной продукции, что могло бы обеспечить устойчивое развитие региона. На небольшой площади Кольского полуострова обнаружено 3/4 всех известных химических элементов. Эта территория уникальна по минералогическому и химическому составу, запасам редкометалльного сырья, циркония, тантала и др. На базе ряда месторождений действуют горно-обогачительные предприятия. Дополнительно представляется целесообразным в порядке импортозамещения хромового сырья создать производство феррохрома на базе руд Сопчеозёрского месторождения; предварительная проработка схемы показала положительные результаты.

Запасы титана в виде ильменит-титаномагнетитовых, перовскитовых руд могут служить для производства металлического титана и пигментного диоксида титана. Мурманская область — единственный российский регион, где осуществляется добыча редкоземельных руд. Необходимо принять меры для извлечения Nb, Ta, Rb, Cs и ряда других редких металлов для обеспечения импортонезависимости страны. Результаты исследований работ по большинству схем извлечения этих элементов дают основание считать их перспективными. Реализация этого проекта может позволить избавиться от импортных поставок нержавеющей стали, хромосодержащих концентратов, титанового сырья для производства титановой губки и пигментного диоксида титана; организовать переработку руд месторождений титана, ниобия, РЗМ, загрузить энергоблоки Кольской АЭС.

\*\*\*

Россия занимает одно из ведущих мест в минерально-сырьевом комплексе мира, а её мине-

рально-сырьевая база составляет основу национальной безопасности, служит инструментом реализации стратегических государственных интересов [1]. В решении проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России значительна роль собственной сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых. Её освоение должно полагаться на научные основы комплексного использования отечественного полиметаллического минерального сырья.

Изложенные в статье материалы будут использованы при разработке предложений в программу развития отечественного металлургического производства с целью выполнения положений “Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 года”, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 28.12.2022. № 4260-р [36].

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Раздел “Ванадий” выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-23-00748.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации”. М.: ВНИГНИ, Гидроспецгеология, 2022.
2. Леонтьев Л.И., Волков А.И. Состояние и развитие минерально-сырьевой базы и продукции металлургии для обеспечения импортонезависимости России // Сб. тр. конф. “Физико-химические основы металлургических процессов” имени академика А.М. Самарина. Выкса, 2022. С. 18–36.
3. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч. 1. Высокоуглеродистый ферромарганец. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.
4. Серёгин А.Н. Разработка комплекса технологических решений, обеспечивающих импортозамещение марганцевой продукции. Ч. 1. Анализ рынка марганца и проблемы обеспечения России марганцевой продукцией // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 15–28.
5. Жуков Д.Ю., Серёгин А.Н. Перспективы производства металлического марганца из бедных руд в России // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2014. № 1. С. 37–42.
6. Серёгин А.Н., Верета Р.А. Проблемы импортозамещения марганцевой продукции // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 5 (1409). С. 9–14.
7. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч. 2. Низкоуглеродистые сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2008.
8. Kivinen V., Krogerus H., Daavittila J. Upgrading of Mn/Fe ratio of low-grade manganese ore for ferromanganese production // Infacon XII: International Ferroalloys Congress “Sustainable Future”. Finland, Helsinki, 2010. P. 467–476.
9. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V. et al. Calculation of the Value of Manganese Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2009. № 8. P. 756–758.
10. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Ferroalloy Production Using Russian Crude Ore // Steel in Translation. 2020. V. 50. № 4. P. 223–228.
11. Кологривов К.А., Серёгин А.Н. Разработка технологии выплавки феррохрома из хромитовых руд Аганозёрского месторождения // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2016. № 4. С. 41–47.
12. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. et al. Main Trends in the Processing of Poor Chrome Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2008. № 8. P. 709–712.
13. Чернобровин В.П., Михайлов Г.Г., Хан А.В., Строганов А.И. Состояние и перспективы производства хромовых сплавов в условиях Челябинского электрометаллургического комбината. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997.
14. Чернобровин В.П., Папкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. и др. Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд. Челябинск: ЮУрГУ, 2004.
15. Папкеев А.И., Папкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. К вопросу о комплексной переработке хромовых руд массива Рай-Из // Вестник ЮУрГУ. Серия “Металлургия”. 2010. № 13. С. 24–31.
16. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I. et al. Russian Chromium Ore in Smelting High-Carbon Ferrochrome at OAO SZF // Steel in Translation. 2008. V. 38. № 4. P. 315–317.
17. Садыхов Г.Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2020. № 3–4. С. 178–194.
18. Тигунов Л.П., Быховский Л.З., Зубков Л.Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения. М.: ВИМС, 2005.
19. Кобелев В.А., Рымкевич Д.А., Степанов Е.А., Зуев А.Г. Двухстадийная технология производства титанового шлака из ильменитовых концентратов // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. № 12. С. 1352–1359.
20. Корзун В.К., Зубков Л.Б., Чистов Л.Б. Современное состояние сырьевой базы титана и циркония России и эффективные пути промышленного освоения российских месторождений // Сб. тр. “Гиредмет – 70 лет на службе в металлургии редких металлов и полупроводников”. М.: ЦИНАО, 2001. С. 41–51.
21. Vorobkalo N.R., Makhambetov E.N., Baisanov A.S. et al. Study of possibility of manufacture of the complex titanium-containing ferroalloy via single-stage carbother-

- mal method // CIS Iron and Steel Review. 2022. V. 24. P. 17–23.
22. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусов Е.Б. и др. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4–5. С. 8–15.
23. Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Ч. 2 // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
24. Лисов В.И. Редкие металлы России: ресурс технологических инноваций. М.: ЦентЛитНефтегаз, 2018.
25. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометалльным сырьём и развития производств феррониобия в России // Тр. научно-практич. конф. “Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: ферросплавы”. Екатеринбург: Альфа-Принт, 2018. С. 36–46.
26. Стулов П.Е., Серёгин А.Н., Пикалова В.С. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобий-содержащих сплавов из концентратов руд Большетажинского месторождения // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2012. № 4. С. 5–11.
27. Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. et al. Potential for obtaining and applying complex niobium ferroalloys // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2022. V. 65. № 1. С. 10–20.
28. Smirnov L.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Complex Vanadium-Containing Ferroalloys // Metallurgist. 2021. № 64. P. 1249–1255.
29. Обзор рынка ванадия и ванадийсодержащей продукции в СНГ. [https://www.marketing-services.ru/imgs/goods/800/gynok\\_vanadija.pdf](https://www.marketing-services.ru/imgs/goods/800/gynok_vanadija.pdf) 2009 (дата обращения 15.03.2023).
30. Фофанов А.А., Новосёлов А.М., Сухов Л.Л. Производство ванадиевой продукции в ОАО “Ванадий-Тула” // Металлург. 2005. № S-1. С. 47–50.
31. Ванадийсодержащие стали и сплавы. Справочник / Под ред. Л. А. Смирнова. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
32. Серёгин А.Н. О проблеме развития рынка ванадийсодержащих сталей // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2010. № 2. С. 92–100.
33. Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в чёрной металлургии России и мира // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 405–418.
34. Волков А.И. Состояние и перспективы использования редких металлов в чёрной металлургии // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 11–18.
35. Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов в Российской Федерации на период до 2035 года // М.: Минпромторг России, 2019. [https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya\\_razvitiya\\_otrasli\\_redkih\\_i\\_redkozemelnyh\\_metallov\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_period\\_do\\_2035\\_goda](https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda) (дата обращения 20.03.2023).
36. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 N 4260-р “О Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года”. [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_436470/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436470/) (дата обращения 15.03.2023).

К 300-ЛЕТИЮ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ИМПЕРАТОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК И ОРГАНИЗАЦИЯ  
СТАТИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИИ

© 2023 г. А. Ю. Скрыдлов<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: askrydlov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2023 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Статья посвящена истории институционального становления статистических исследований в Императорской Академии наук. Отмечено, что первые попытки статистических описаний территории России относятся ко второй четверти XVIII в. Они находились в русле немецкой традиции описательного государствоведения и предполагали систематизацию географических, этнографических, политических и экономических сведений, важных для развития страны. Распространению государствоведения в России способствовали приглашённые в страну немецкие учёные. Опираясь на широкий круг опубликованных источников и архивных материалов, автор анализирует процесс вхождения статистики-государствоведения в перечень академических дисциплин, изучает вклад первых академиков-статистиков в развитие этой отрасли знаний. В статье проанализированы различные формы поддержки Академией наук статистических исследований.

**Ключевые слова:** история Российской академии наук, история статистики, А.Л. Шлёцер, А.К. Шторх, К.Ф. Герман, П.И. Кёппен.

DOI: 10.31857/S0869587323070095, EDN: RQBGYE

С момента основания Санкт-Петербургская Академия наук играла роль универсального научного центра, перед которым были поставлены самые разнообразные исследовательские задачи. “Проект положения об учреждении Академии наук и художеств” 1724 г. и “Регламент Императорской Академии наук и художеств” 1747 г. определили структуру, цели и круг занятий нового учреждения [1, с. 31–61]. Осуществляя фундаментальные и прикладные исследования, Академия наук вскоре после создания приняла на себя ряд

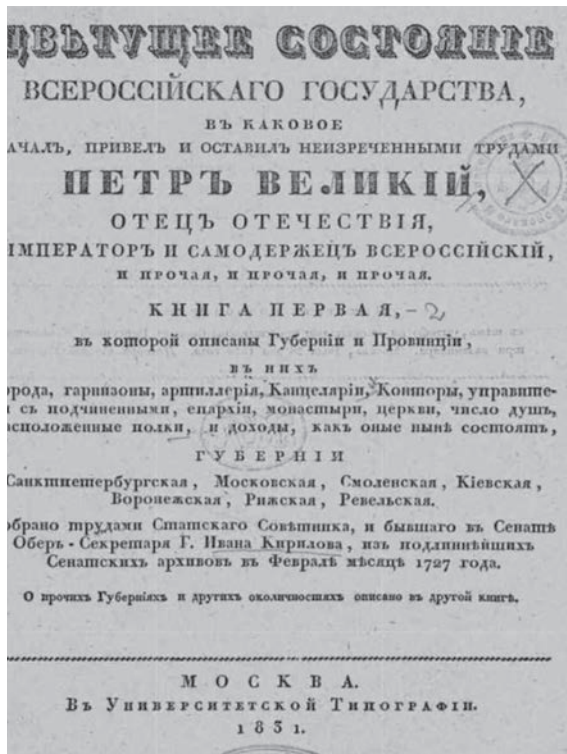
функций, прямо не предусмотренных нормативными документами. Одним из важнейших направлений её деятельности уже в XVIII в. стала организация комплексного изучения обширной территории России. В ходе экспедиционной деятельности Академии наук проводилось изучение природных условий, описание флоры и фауны страны, формировались естественно-научные коллекции.

Вклад Академии наук в географическое познание России традиционно привлекал внимание историков науки и достаточно подробно исследован в отечественной историографии. Гораздо в меньшей степени изучена роль академии как центра статистических исследований, которые в XVIII – первой половине XIX в. предполагали сбор и систематизацию сведений как о природных условиях, так и о населении и различных отраслях хозяйства страны.

В Западной Европе становление статистики как отрасли знания происходило на протяжении XVII–XVIII вв. в двух направлениях. Первым из них стала так называемая описательная школа государствоведения, которая развивалась в немец-



СКРЫДЛОВ Андрей Юрьевич — кандидат исторических наук, заведующий сектором истории Академии наук и научных учреждений СПбФ ИИЕТ РАН.



Титульный лист книги И.К. Кирилова «Цветущее состояние всероссийского государства...»

ких университетов. Основателем новой дисциплины принято считать учёного-энциклопедиста Германа Конринга, который в 1660 г. в Гельмштедте начал преподавание курса о «достопримечательностях» разных стран. Главную задачу государственоведения Конринг видел в том, чтобы создать точное описание современного состояния государства, которое должно было включать географические, этнографические, политические и экономические сведения, имеющие значение для развития страны [2, с. 42, 43]. Важную роль в развитии государственоведения сыграл Готфрид Ахенваль, благодаря которому дисциплина окончательно обрела форму и содержание, была признана не только в немецких землях, но и за их пределами. Одновременно с немецким описанием направлением в Англии получила распространение «школа политических арифметиков». Её представители Уильям Петти, Грегори Кинг, Чарльз Давенант ставили перед собой задачу изучать причинно-следственные связи и закономерности общественной жизни с использованием количественных методов [3, с. 20–23].

По справедливому замечанию одного из первых историков статистики А.А. Кауфмана, «из тех двух источников, слияние которых дало начало современной статистике, русская статистическая наука, в раннем периоде своего развития, черпала

только из одного — из немецкой, по преимуществу описательной статистики, и совершенно ничего не черпала из другого — из английской, по преимуществу, политической арифметики. Это было естественно и неизбежно, ввиду той огромной роли, которую сыграла вообще немецкая наука, и какую сыграли, в частности, немцы-академики в ранней истории русской науки» [4, с. 5]. Немецкая традиция описательного государственоведения начала активно проникать в Россию во второй четверти XVIII в. Первым отечественным трудом в этом жанре принято считать сочинение И.К. Кирилова «Цветущее состояние Всероссийского государства...», составленное около 1727 г. [5]. Главной целью этой работы стала пропаганда результатов петровских реформ. Используя доступные ему материалы из архива Сената, он систематизировал сведения о штате присутственных мест, войсках и флоте, государственных доходах и расходах, промышленности, школах, епархиях и монастырях по 12 губерниям. Основным источником для Кирилова стали присланные из губерний ответы на «вопросные пункты» Сената — анкеты, разосланные по губерниям в 1724 г. [6].

Сбор сведений о природе, населении и хозяйстве при помощи рассылки анкет на места стал основным методом накопления статистических данных. В 1734 г. В.Н. Татищев отправил свой вариант «Предложений с вопросами» в канцелярии Урала и Сибири. В 1737 г. он разработал новый вариант анкеты: вопросы были сформулированы более детально, а их количество увеличилось. Эти анкеты были переданы геодезистам, которые одновременно со съёмкой собирали сведения о местности [7, с. 165]. В феврале 1739 г., после смерти Кирилова, Татищев передал в Академию наук его рукописные материалы, в том числе труд «Цветущее состояние Всероссийского государства...» [6, с. 30].

Потребность в сборе и систематизации статистических сведений о России понимали российские академики. Одним из первых об этом заговорил астроном и картограф Ж.Н. Делиль. 18 февраля 1828 г. на заседании Конференции Академии наук он прочёл доклад о методах составления точных географических карт Российской империи [8, с. 67]. Необходимым элементом картографического описания учёный считал «географический и исторический очерк страны с указанием достопримечательностей в каждой отдельной области и описанием нравов и обычаев её жителей» [9, с. 9]. Вскоре центром сбора первичных данных о территории и населении России стал Географический департамент, основанный в 1739 г. по инициативе Делиля. Во второй половине XVIII в. департамент возглавил М.В. Ломоносов, под руководством которого картографические работы переросли в масштабный план по сбору инфор-

мации из губерний. Ломоносов, как и его предшественники, считал нужным организовать сбор сведений о России путём рассылки опросных листов от имени Академии наук. 26 мая 1759 г. на заседании Конференции он предложил обратиться в Сенат с просьбой о содействии к получению извещений по 13 вопросным пунктам, которые планировалось направить в губернии. Проект составленной Ломоносовым анкеты обсуждался в Историческом собрании Академии наук, где был сформирован окончательный перечень из 30 вопросов. После одобрения Сената в академической типографии напечатали 600 экземпляров анкеты, которые были разосланы в губернии. Губернскому начальству предлагалось собирать сведения путём опроса местных жителей, а в случае необходимости направлять специальных чиновников для проверки полученных данных.

Для уточнения сведений о населённых пунктах и составе населения на заседании Исторического собрания Академии наук было решено запросить у Камер-коллегии материалы, полученные в ходе второй ревизии (подушной переписи) 1742 г.<sup>1</sup> При подготовке к третьей ревизии Ломоносов попытался использовать её для сбора интересующих академию сведений. В 1761 г. он предложил обязать лиц, производивших ревизию, заполнять, кроме того, анкету из 7 вопросов, однако эта идея не была осуществлена. По инициативе Ломоносова была предпринята попытка получить данные о численности населения, которые накапливались в церковных приходах и находились в ведении Святейшего Синода [7, с. 204–206]. К сожалению, лишь малая часть планов Ломоносова была реализована. В источниках не сохранилось упоминаний о передаче в Академию наук каких-либо сведений из Синода относительно монастырей и церквей. Списки населённых мест с количеством душ по второй ревизии из Камер-коллегии поступали крайне медленно, и при жизни Ломоносова эти материалы так и не были обработаны. Наиболее существенное значение имело анкетное обследование, которое, однако, затянулось на 10 лет [10, с. 9]. После смерти Ломоносова в 1765 г. его бумаги, в том числе ответы на запросы, были опечатаны и лишь в XIX в. возвращены академии.

Во второй половине XVIII в. наибольший вклад в распространение каноничности немецкого государственного управления в России внёс А.Л. Шлёцер, который в 1761–1767 гг. вёл научную работу в Петербурге и был избран членом Академии наук. В сво-

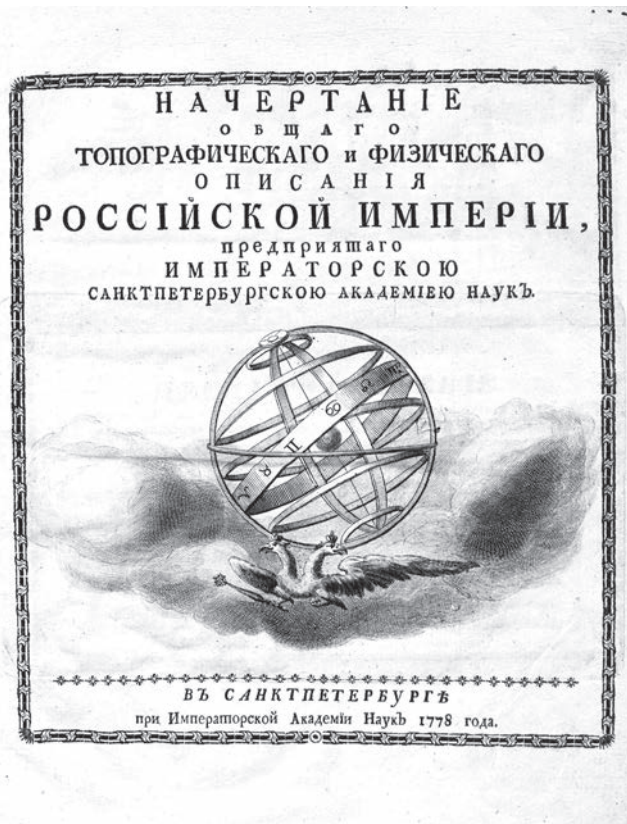


Август Людвиг Шлёцер (1735–1809)

их мемуарах Шлёцер оставил характерные свидетельства о восприятии новой дисциплины в российском обществе: “Русские же только в следующие годы открыто стали изучать своё огромное отечество, т.е. писать о нём и печатать. <...> Прежде об этом нельзя было и подумать, потому что статистика и деспотизм несовместимы <...> Даже самые сведения о ввозе и вывозе товаров считались тогда государственной тайной”. Более терпимое отношение к собиранию сведений о “государственных достопримечательностях” учёный связывал с “либеральным образом мыслей” Екатерины II, которая “ограничила понятие о государственной тайне” [11, с. 120, 121]. За годы работы в России у Шлёцера возник амбициозный план создания обобщающего статистического труда, в котором описывалась бы обширная территория страны, её население и хозяйство. При помощи советника Канцелярии академии И.И. Тауберта Шлёцер получил доступ к делопроизводственным материалам из архивов Сената и коллегий. Его масштабный замысел не был реализован, однако собранные материалы легли в основу сочинения “Обновлённая Россия, или жизнь Екатерины II, императрицы Всероссийской. Из достоверных сведений”, который Шлёцер издал в 1767–1772 гг. уже после отъезда из России.

Пониманию роли статистических исследований в формировании целостного представления о

<sup>1</sup> В историографии существуют разночтения по поводу даты начала второй ревизии. 17 сентября 1842 г. было утверждено мнение Сената о необходимости проведения новой ревизии. Начался процесс подготовки. Указ о ревизии и инструкция были изданы лишь год спустя, 16 декабря 1743 г. В данном случае указана дата первого нормативного документа.



Обложка книги “Начертание общего топографического и физического описания Российской Империи”

территории России способствовали физические экспедиции Академии наук 1768–1774 гг. и последующая работа по обобщению собранного материала. Первоначально обработка и издание экспедиционных отчётов отдельных отрядов происходили независимо друг от друга [12, с. 127]. В 1776 г. по инициативе директора АН С.Г. Домашнева при академии был создан Топографический комитет. Его задача состояла в систематизации результатов экспедиций и подготовке на их основе труда, обобщающего данные по различным отраслям знания. Изложение сведений в будущем труде Домашнев предлагал разделить на географическое, историческое, политическое, физическое и экономическое описание и “вместить туда, где случай представится, все виды, кои могут служить к примечанию и выгоде, не только настоящей, но и будущей” [13, с. 3, 4]. В комитет вошли авторитетные члены академии С.Я. Румовский, П.С. Паллас, Э. Лаксман, И.И. Лепёхин, И.А. Гюльденштедт, а также адъюнкты П.Б. Иноходцев и И.Г. Георги [14, с. 127].

18 октября 1777 г. на заседании Конференции Лепёхин представил развёрнутый план коллективного сочинения “Начертание общего топографического и физического описания Российской империи Санкт-Петербургской Академии наук”.

На следующий год этот план был издан в академической типографии. Один из разделов плана — “Общее статистическое описание Российского государства” — разработал Гюльденштедт, опираясь на основные принципы государственного управления. В описание предполагалось включить сведения о штатах центральных и губернских учреждений, об армии и флоте, об устройстве церковно-приходской системы и численности духовенства. Весьма подробно планировалось охарактеризовать количественный и социальный состав населения, а также состояние земледелия, промыслов, торговли и финансов [15, с. 23–26]. Однако после начала работы участникам комитета стала очевидна нехватка материалов для претворения в жизнь предложенной программы. Сведения из губерний, продолжавшие приходить в ответ на разосланные Ломоносовым анкеты, были неточны, требовали сложной и продолжительной проверки и систематизации. Члены комитета вскоре сосредоточились на собственных исследовательских проектах, каких-либо свидетельств практической реализации намеченной комитетом программы в источниках обнаружить не удалось. Вместе с тем подготовка проекта описания позволила подвести некоторые итоги состояния географических и статистических знаний о России и поставить конкретные задачи на перспективу.

Программа исследований Топографического комитета свидетельствует, что во второй половине XVIII в. необходимость сбора и систематизации статистических сведений была окончательно признана академическим сообществом. Однако согласно Регламенту 1747 г. статистика не входила в число академических дисциплин, её изучением занимались отдельные учёные-энтузиасты. Так, в конце XVIII в. несколько работ в духе государственного управления подготовил академик по классу минералогии И.Ф. Герман. Существенный вклад в изучение численности и движения населения внёс физик Л.Ю. Крафт.

В начале XIX в. ценность статистических сведений для проведения взвешенной внутренней и внешней политики стала осознавать и правящая элита России. Реформы в сфере государственного управления начала царствования Александра I, нарастающие изменения в экономической жизни, оживление общественной мысли — все эти факторы вызвали потребность в получении актуальной информации о состоянии страны. Статистические исследования нуждались в организационной поддержке со стороны государства и организационном оформлении. Первым институциональным центром изучения статистики в России ожидаемо стала Санкт-Петербургская академия наук. В перечне академических дисциплин статистика появилась в 1802 г. в ходе подготовки нового регламента академии. Учреждённый 18 марта 1802 г. Комитет для рассмотрения

новых уставов учёных заведений подготовил проект преобразования академии [16, л. 23]. Согласно документу, одна из пятнадцати академических кафедр предназначалась для академика по истории и статистике. Совмещение на одной кафедре исторических и статистических исследований в целом соответствовало немецкой традиции описательного государствоведения, которое изучало современное состояние государства в сравнении с прошлым. В историографии наиболее вероятными авторами проекта называют членов упомянутого комитета Н. Фусса и Ф. Баузе. Последний, профессор Московского университета, получил образование на юридическом факультете в Лейпцигском университете — одном из центров немецкого государствоведения [17, с. 85–97].

Однако реализации проекта комитета помешала отставка президента Академии наук А.И. Николаи. Новым президентом был назначен Н.Н. Новосильцов — англоман, один из наиболее деятельных и просвещённых “молодых друзей” Александра I. Он внёс существенные коррективы в подготовленные ранее проекты, в частности, был пересмотрен перечень научных специальностей и академических кафедр. Среди прочих изменений статистические исследования были отделены от истории и объединены на одной кафедре с политической экономией. Такое распределение научных занятий выходило за рамки традиционных представлений о предмете и методе камеральных наук, принятых в немецких землях. Соединение политэкономических и статистических исследований, больше характерное для английской школы политических арифметиков, в перспективе способствовало расширительному толкованию задач, которые ставили перед собой первые российские академики-статистики. К описанию и систематизации фактов о “государственных достопримечательностях” добавилось стремление к установлению причинно-следственных связей и закономерностей развития отдельных явлений общественной жизни. Предложенное Новосильцовым распределение дисциплин было закреплено в Регламенте Императорской Академии наук, утверждённом 25 июля 1803 г. В § 3 документа среди наук, “коих усовершенствованием Академия должна заниматься”, были указаны “статистика и экономия политическая” [1, с. 63]. В штатах академии по этому классу было предусмотрено одно место ординарного академика и одно — адъюнкта.

Согласно протоколам Общего собрания академии, первые выборы ординарного академика по классу политической экономии и статистики состоялись 1 февраля 1804 г. По рекомендации Н.И. Фусса, Л.Ю. Крафта, Ф.И. Шуберта на это место был избран Андрей Карлович Шторх (1766–1835) [19, л. 14–14 об.]. Уроженец Остзейского края Российской империи, он слушал лек-

ции в Йенском и Гейдельбергском университетах — колыбели немецкой камералистики, а по возвращении в Россию при содействии Н.П. Румянцева получил место преподавателя истории и словесности в Сухопутном кадетском корпусе. Первые статистические сочинения Шторха — двухтомное “Описание Петербурга” (1794), “Статистический обзор губерний по их достопримечательностям и культурному состоянию, в таблицах” (1795), “Материалы к познанию Российской империи” (1796–1798) — принесли ему известность в учёных кругах. С 1796 г. Шторх носил звание члена-корреспондента Академии наук, а с 1799 г. состоял при императрице Марии Фёдоровне, обучал великих князей литературе и истории. Одной из главных инициатив Шторха после избрания стал выпуск периодического журнала “Россия в царствование Александра I”, в котором публиковались материалы о государственном управлении, торговле, науках и искусстве в России начала XIX в. Издание выходило на немецком языке и было ориентировано преимущественно на зарубежных читателей [20, с. 165–208].

Несмотря на достижения в области государствоведения, после избрания ординарным академиком Шторх сосредоточился на изучении политической экономии, о чём свидетельствуют темы его научных докладов на Общем собрании академии и публикации в академических изданиях. Собственно статистические исследования оказались поручены адъюнкту по этой кафедре. Конкурс на эту должность состоялся 27 марта 1805 г., в нём участвовали ректор Академической гимназии К.Ф. Герман и профессор истории и географии Педагогического института Е.Ф. Зябловский. В академических протоколах от 17 февраля сохранились отзывы Шторха на конкурсные сочинения соискателей. Академик в положительном ключе характеризовал работу Германа, отмечая его знакомство с достижениями зарубежных авторов и систематический подход к изучению предмета. Шторх сделал вывод о том, что Герман “в совершенстве освоил науку, которой собирается заниматься”. Сочинение Зябловского, напротив, подверглось резкой критике. По замечанию Шторха, работа “представляет собой рапсодию, лишённую логики. В ней можно отыскать отдельные верные мысли и идеи, но они, похоже, не принадлежат автору, потому что в других частях работы он прямо противоречит им. Приведённые отрывки из мемуара доказывают, что Зябловский не знает, что такое статистика, и недавно узнал о существовании политической экономии” [21, Л. 23 об.—24].

По результатам выборов место адъюнкта досталось Карлу Фёдоровичу Герману (1767–1838) — уроженцу Данцига, выпускнику Гёттингенского университета, ученику Шлёцера. Как и Шторх, он начал карьеру в России с преподавания в ка-



Обложка "Статистического журнала"

детском корпусе, сумел достаточно быстро зарекомендовать себя и получил место ректора Академической гимназии. После избрания адъюнктом, вдохновляясь опытом Шторха, Герман предпринял попытку наладить при Академии наук выпуск специализированного периодического издания — "Статистического журнала". За 1806–1808 гг. ему удалось опубликовать четыре номера. Перечень авторов, которых К.Ф. Герман привлёк к сотрудничеству, был весьма представительным: академик И.Ф. Герман, работавший над проблемами развития горного дела и статистики населения России; видный экономист Ф.Г. Вирст; историк и демограф А.Х. Лерберг; экономист М.А. Балугьянский и другие. Статьи в каждом из номеров журнала были объединены в три группы: по теории статистики и политэкономии, статистические обзоры и информационные материалы. В первом разделе доминировали труды К.Ф. Германа по теории статистики. Наиболее обширной из помещённых в журнале статей стала работа М.А. Балугьянского, пропагандировавшего идеи

А. Смита и одновременно доказывавшего необходимость проведения либеральных реформ в России. В рубрике "Материалы для российской статистики" на основании отчётов Министерства внутренних дел печатались статистические описания Саратовской, Таврической, Ярославской губерний, статьи о русских армии и флоте. Материалы третьей группы были связаны с обработкой и обобщением сведений, полученных из географических экспедиций.

Среди подписчиков на первый том журнала числились виднейшие сановники царствования Александра I В.П. Кочубей, Н.Н. Новосильцов, А.С. Строганов, А.С. Шишков и другие [22, с. 265–268]. Однако инициатива Германа не получила материальной поддержки со стороны Академии наук, и средства на издательские расходы приходилось изыскивать из сторонних источников, прежде всего за счёт подписки. К 1808 г. число подписчиков журнала существенно сократилось. Трудности с финансированием разрешить не удалось, и в 1809 г. Герман был вынужден прекратить работу над изданием. Тем не менее журнал стал важной вехой в развитии отечественной статистики, являясь одновременно площадкой для опубликования передовых научных достижений в этой области знаний и средством популяризации статистики в просвещённых кругах [23, с. 250].

Прекращение выпуска "Статистического журнала" позволило Герману сосредоточиться на подготовке собственных монографических трудов. В 1808 г. вышла в свет его книга "Краткое руководство ко всеобщей теории статистики", а в следующем году — "Всеобщая теория статистики". Эти работы стали первыми в России теоретическими трудами в области статистики-государствоведения. Характеризуя главную задачу статистики, Герман указывал на важность не только объективного описания относящиеся к благосостоянию государства предметов и явлений, но и их "историко-политического истолкования", выявления преимуществ и недостатков "государственных достопримечательностей", установления причинно-следственных связей. Таким образом, в работах учёного наметился отход от классического немецкого государствоведения, которое он трактовал в политэкономическом ключе.

Биография Германа демонстрирует удачное сочетание плодотворной научной работы, преподавательской деятельности и государственной службы. Академик стоял у истоков первого в России государственного органа административной статистики, занимал первую самостоятельную кафедру статистики в Петербургском университете. В ходе "дела профессоров" 1821 г., Герману в качестве обвинения было предъявлено именно расширительное толкование предмета статистики, которую, по мнению критиков, он превратил

“из науки простой в мудрствование о праве естественном”<sup>2</sup> [24, с. 160].

Увольнение из университета не помешало академической карьере учёного. В 1810 г. он был избран экстраординарным академиком, а в 1835 г., после смерти Шторха, занял место ординарного академика. Протоколы Общего собрания академии позволяют очертить круг научных интересов Германа. В разные годы он делал доклады о состоянии сельского хозяйства в России, о статистике внутриторгового оборота, о рыбных промыслах, о численности населения и распределении жителей страны по религиям и сословиям, о статистике убийств и самоубийств [25, с. 32–264]. Источниками для этих исследований служили главным образом делопроизводственные материалы МВД, к которым Герман имел неограниченный доступ в качестве начальника Статистического отделения.

Согласно Регламенту 1803 г. кроме ординарных академиков и адъюнктов в состав Академии наук могли входить до 20 воспитанников, которые составляли “первую степень академическую” [26, с. 105–114]. Воспитанник прикреплялся к ординарному академику и в течение трёх лет проходил обучение по выбранной специальности. Из протоколов Общего собрания академии известно, что 5 июня 1811 г. на вакантное место воспитанника был зачислен выпускник Педагогического института Андрей Владиславлев, руководство его подготовкой поручили Шторху. В документах сохранились упоминания о том, что в октябре 1812 г. Шторх представил первую работу своего ученика, посвящённую организации работы банков. К 1817 г. обучение Владиславлева было завершено, и по рекомендации Шторха ему было поручено чтение публичных лекций по политической экономии и статистике. В ноябре 1817 г. Герман дал положительную рецензию на подготовленную Владиславлевым программу лекций. Неизвестно, успел ли воспитанник Шторха приступить к чтению лекций. Из протоколов следует, что в декабре 1818 г. Шторх сообщил Общему собранию академии о смерти Владиславлева от чахотки [25, с. 95–151].

Своего преемника первым академиком-статистикам пришлось искать за пределами академической корпорации. Им стал Пётр Иванович Кёппен (1793–1864) — чиновник Министерства государственных имуществ, известный своими

<sup>2</sup> В 1821 г. попечитель Санкт-Петербургского учебного округа Д.П. Рунич провёл ревизию в Санкт-Петербургском университете с целью “ограждения университетского преподавания от вредного духа”. После рассмотрения студенческих конспектов против ряда преподавателей социальных и политических наук были выдвинуты обвинения в пропаганде вольнодумства и безбожия. “Дело профессоров” обозначило поворот к консервативной политике в области просвещения на исходе царствования Александра I.

# В С Е О Б Щ А Я ТЕОРИЯ СТАТИСТИКИ.

Д Л Я О В У Ч А Ю Щ И Х Ъ  
с ей нау къ.

из да н н а я

отъ Главнаго Правленія училищъ.

ВЪ С А Н К Т П Е Т Е Р Б У Р Г Ъ,

При Императорской Академіи Наукъ  
1809 года.

Обложка учебника К.Ф. Германа “Всеобщая теория статистики”

работами в области языкознания, истории древностей, статистики и географии южных губерний России. Уже первые научные достижения Кёппена были отмечены Академией наук, и в 1825 г. он получил звание члена-корреспондента. В последующие годы по заданию МВД Кёппен путешествовал по югу России, собирая сведения о состоянии различных отраслей хозяйства. Авторитет Кёппена-учёного укрепился после публикации “Крымского сборника” — уникального для того времени исследования о крымских древностях [27]. В 1834 г. президент академии С.С. Уваров пригласил Кёппена редактировать немецкую версию “Санкт-Петербургских ведомостей”. Вероятно, он же поспособствовал избранию Кёппена адъюнктом по классу статистики и политической экономии в 1837 г. Таким образом, ординарный академик Герман получил энергичного и пер-

спективного помощника, однако в этом составе кафедра просуществовала лишь чуть больше года. Герман умер 19 декабря 1838 г., и Кёппен остался единственным статистиком в академии. В 1839 г. из адъюнктов он был повышен до экстраординарного академика, а в 1843 г. был избран ординарным академиком. Освободившееся место адъюнкта пустовало следующие 9 лет, пока в 1852 г. его не занял К.С. Веселовский.

Одной из центральных тем исследований Кёппена стала статистика населения. Учёный активно занимался обработкой материалов ревизий и вносил предложения по совершенствованию формы их проведения, особенно интересовался этническим составом населения России. Его масштабный проект — составление полного перечня всех городов, посадов и местечек России. Кёппен разработал оригинальную классификацию населённых пунктов. Кроме того, совместно с В.Я. Струве и другими сотрудниками Пулковской обсерватории он занимался измерением площади российских губерний, активно участвовал в работе Учёного комитета Министерства государственных имуществ, Временного статистического комитета Министерства внутренних дел [28, с. 31–61]. Следует сказать, что характерной особенностью карьерных траекторий российских академиков-статистиков первой половины XIX в. было совмещение научной работы со службой в государственных ведомствах, которые занимались сбором статистических данных. Служба давала им возможность использовать министерскую инфраструктуру для сбора и обработки необходимых для их исследований данных, облегчала прохождение ведомственной цензуры, в некоторых случаях позволяла рассчитывать на финансирование издательских расходов. Однако она была сопряжена с большим объёмом чисто административных обязанностей, порой тягостных для учёного.

Новый Устав Императорской Санкт-Петербургской Академии наук, утверждённый в 1836 г., не внёс существенных перемен в статус статистических исследований. Статистика и политическая экономия оставались объединены на одной кафедре. Непосредственное отношение к задачам статистики имел третий параграф устава, где декларировалась обязанность Академии наук «обращать особенное внимание на источники богатства и силы государства» [1, с. 92]. Последующие попытки реформирования академии также предусматривали некоторое расширение статистических задач. В 1841 г. при обсуждении реформы Академии наук в связи с присоединением к ней Российской академии был разработан проект нового устава. Документ существенно расширял цели экспедиционной деятельности академии: «исторические, статистические и лингвистические исследования об Отечестве, могут и должны



Пётр Иванович Кёппен (1793–1864)

быть предметом учёных экспедиций» [29, с. 350]. Тогда же, в начале 1840-х годов, впервые был поставлен вопрос о введении в штат отдельной ставки академика по классу статистики и отделения последней от политической экономии. Среди предложений по расширению деятельности Третьего отделения академии, поданных президенту Академии наук графу С.С. Уварову в 1842 г., сохранилась записка Кёппена «О разделении политической экономии от статистики и об учреждении при Академии вместо одного, двух мест ординарных академиков по сим частям». Учёный подчёркивал, что расширение штата необходимо, чтобы «в сих науках, имеющих непосредственное применение к пользам государства <...> Академия, сообразно уставу своему, явила собою авторитет» [30, л. 438 об.]. Однако это предложение не получило поддержки.

Особенность организации статистических исследований в Академии наук заключалась в том, что их проводили не только профильные академики, но и учёные, избранные по другим кафедрам. Со статистикой были связаны научные интересы ученика К.Ф. Германа К.И. Арсеньева, однако он состоял академиком по Отделению русского языка и словесности. Надо сказать, что на область государственного распространения интересов и других академиков этого отделения — М.Т. Каченовского и М.П. Погодина. В число тех, кто разрабатывал то или иное направление государственного, входили члены-корреспон-

денты академии Н.А. Полевой, В.И. Даль, Ю.А. Гагемейстер, А.П. Заблоцкий-Десятовский, Е.И. Ламанский. Неудавшейся попыткой создать на базе Академии наук площадку для объединения интересующихся статистикой учёных стал проект Кёппена “Об учреждении статистической обсерватории”, датированный 1854 г. Суть предложения состояла в организации свободного доступа к хранившимся в академии статистическим сочинениям и накопленным первичным данным “каждому члену Императорской Академии наук, профессорам университетов и вообще каждому лицу известному по статистическим своим трудам” [31, л. 1–3].

В целом стремление академиков-статистиков инициировать крупные исследовательские проекты в первой половине XIX в. неизбежно сталкивались с проблемой ограниченности материальных и кадровых ресурсов академии. С распространением преподавания статистики в высших учебных заведениях появилась потребность в едином научном центре, который координировал бы статистическую деятельность растущего числа интересующихся этой отраслью знания. Однако специфика организации научной работы не позволила Академии наук взять на себя эту функцию. В середине XIX в. центр изучения статистики был сформирован на базе Русского географического общества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уставы Академии наук СССР. М.: Наука, 1974.
2. Взаимосвязи российской и европейской экономической мысли: опыт Санкт-Петербурга / Под ред. И.И. Елисеевой и А.Л. Дмитриева. СПб.: Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2013.
3. Птуха М.В. Очерки по истории статистики XVII–XVIII вв. М.: ОГИЗ Госполитиздат, 1945.
4. Кауфман А.А. Статистическая наука в России. М.: Типография М.К.Х., 1922.
5. Кирилов И.К. Цветущее состояние всероссийского государства, в каковое начал, привёл и оставил неизреченными трудами Пётр Великий, отец отечества, император и самодержец всероссийский. М., 1831.
6. Новлянская М.Г. И.К. Кирилов и его Атлас Всероссийской империи. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1958.
7. Птуха М.В. Очерки по истории статистики в СССР. В 2 т. Т. I. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
8. Летопись Российской Академии наук. В 3-х т. Т. I. 1724–1802. СПб.: Наука, 2000.
9. Свенске К.Ф. Материалы для истории составления Атласа Российской империи. СПб., 1866.
10. Елисеева И.И. Основополагающие экономико-статистические исследования Петербургской Академии наук во второй половине XVIII – начале XIX вв. // Вклад Академии наук в познание России. Материалы Международного симпозиума 18 июня 2001 г. СПб., 2002. С. 7–25.
11. Шлёцер А.Л. Общественная и частная жизнь Августа Людвига Шлёцера, им самим описанная. СПб.: Типография Императорской Академии наук, 1875.
12. Александровская О.А. Становление географической науки в России в XVIII веке. М.: Наука, 1989.
13. Начертание общего топографического и физического описания Российской империи. СПб.: При Императорской Академии наук, 1778.
14. Лагус В. Эрик Лаксман, его жизнь, путешествия, исследования и переписка. СПб.: Издание Императорской Академии наук, 1890.
15. Сухова Н.Г. К истории организации географических исследований Академии наук XVIII в. (Неосуществлённый проект общего описания России) // Наука и техника (вопросы истории и теории). Вып. VIII. Ч. 1. Л., 1973.
16. РГИА. Ф. 733. Оп. 12. Д. 8.
17. Каратаев Н.К. Возникновение политической экономики в Академии наук // Вестник АН СССР. 1947. № 3. С. 85–97.
18. Любезников О.А. Николай Николаевич Новосильцов – государственный деятель императорской России первой трети XIX века: дис. ... канд. ист. наук. СПб., 2013.
19. СПбФ АРАН. Ф. 1. Оп. 1. Д. 55.
20. Якутин Ю.В. Труды и научные заслуги А.К. Шторха (1766–1835) – первого российского академика в области политэкономии и статистики // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2020. № 3. С. 165–208.
21. СПбФ АРАН. Ф. 1. Оп. 1. Д. 56.
22. Статистический журнал, издаваемый Карлом Германом. 1806. Т. I. Ч. 1.
23. Скрыдлов А.Ю. Государствоведение в Санкт-Петербургской Академии наук (XVIII – первая половина XIX вв.) // Основанная Петром Великим: Академия наук в XVIII – первой половине XIX в. / Отв. ред. А.Ю. Скрыдлов и Г.И. Смагина. СПб.: Росток, 2021. С. 237–254.
24. Скрыдлов А.Ю. “Дело профессоров” Санкт-Петербургского университета 1821 г. в истории российской статистики // Genesis: исторические исследования. 2021. № 11. С. 156–168.
25. Летопись Российской академии наук. В 3-х т. Т. II. 1803–1860. СПб.: Наука, 2002. С. 32–264.
26. Императорская Академия наук на пути обновления в 1801–1855 гг.: исторические очерки / Ред. и сост. Е.Ю. Басаргина. СПб.: Нестор история, 2021. С. 105–114.
27. Кёппен П.И. О древностях Южного берега Крыма и гор Таврических. СПб.: Типография Императорской Академии наук, 1837.
28. Сухова Н.Г., Красникова О.А. К биографии П.И. Кёппена // Деятели русской науки XIX–XX веков / Отв. ред. И.П. Медведев. Вып. 1. СПб.: Дмитрий Буланин, 2000. С. 31–61.
29. Актуальное прошлое: взаимодействие и баланс интересов Академии наук и Российского государства в XVIII – начале XX в. Очерки истории: в 2 кн. / Сост. и отв. ред. И.В. Тункина. Кн. I. СПб.: Реноме, 2018.
30. РГИА. Ф. 733. Оп. 12. Д. 8.
31. СПбФ АРАН. Ф. 30. Оп. 1. Д. 192.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

АКТУАЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ВУЗОВСКОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ НАУКИ

© 2023 г. В. П. Заварухин<sup>а,\*</sup>, О. А. Антропова<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем развития науки РАН, Москва, Россия

\*E-mail: V.Zavarukhin@issras.ru

\*\*E-mail: O.Antropova@issras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

Цель исследования — выявить особенности и перспективы становления вузовского сектора российской науки, в том числе с учётом современных зарубежных тенденций. Статья содержит подробный анализ некоторых актуальных аспектов развития вузовской науки на основе данных статистики и результатов социологических опросов о степени вовлечённости вузов и их подразделений в выполнение исследований и разработок, о структуре затрат, видах и источниках финансирования исследований, динамике развития кадрового потенциала и некоторых показателей системы подготовки кадров высшей квалификации в аспирантуре.

Исходя из представленных в статье международных сравнений авторы ставят вопрос о целесообразности и обоснованности широкого участия вузов в реализации НИОКТР и в конечном счёте о способности в таких условиях обеспечивать высокий уровень подготовки выпускников.

Принимая во внимание отсутствие в России вузов, которые специализировались бы главным образом на фундаментальных исследованиях, делается вывод о необходимости создания на базе отделений и научных центров Российской академии наук исследовательских университетов, наделённых правом самостоятельной разработки стандартов и программ подготовки научных кадров высшей квалификации. Утверждается, что для реализации актуальных задач социально-экономического развития страны целесообразно развивать альянсы и консорциумы организаций науки, образования и бизнеса.

**Ключевые слова:** вузовский сектор науки, выполнение научных исследований и разработок, кадровый потенциал вуза, аспирантура, фундаментальные исследования, прикладные исследования, Болонский процесс, оценка результативности научной деятельности.

DOI: 10.31857/S0869587323070113, EDN: UPQCAI



ЗАВАРУХИН Владимир Петрович — кандидат экономических наук, директор ИПРАН РАН. АНТРОПОВА Ольга Александровна — кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник ИПРАН РАН.

Зарождение основ системы высшего образования в России связывают с открытием в 1725 г. Петербургской Академии наук [1, с. 27], которая, в отличие от европейских академий, лишь подводя итоги университетских исследований, создавалась в качестве центра проведения научных исследований [1, с. 28]. В состав академии, как известно, входили университет и гимназия, что позволяло ей реализовывать научные и учебные функции, а также задачи популяризации науки в стране. В советский период вузам была отведена почти исключительно образовательная роль, и до недавнего времени доминирующей формой организации науки в России был научно-исследовательский институт [2]. Лишь в последние годы ведущие российские университеты ста-

ли превращаться в исследовательские институты [2].

Процесс переноса фундаментальной и прикладной науки в университеты с акцентом на прикладные исследования и разработки стартовал примерно с середины 2000-х годов и сопровождался существенным ростом финансовой поддержки вузовского сектора науки на фоне снижения финансирования научных организаций Российской академии наук [3, с. 10, 11]. Этому предшествовало упразднение в 2000 г. Министерства науки и технологий РФ и создание на его основе Министерства промышленности, науки и технологий РФ, а затем, в 2004 г., учреждение Министерства образования и науки РФ, которое в 2018 г. было разделено на Министерство науки и высшего образования РФ и Министерство просвещения РФ, курирующее общее и среднее профессиональное образование. Передача научной сферы под крыло Минобрнауки России стало отражением лидирующего тренда, направленного не столько на внедрение новейших достижений науки в производство, сколько на интеграцию науки с системой образования.

За основу преобразований в российской системе образования и науки был взят опыт зарубежных стран, в соответствии с которым научные лаборатории традиционно располагаются в стенах высших учебных заведений. Однако, как представляется, при этом не были приняты во внимание сильные стороны сложившейся за столетия модели российской науки, как не удалось пока сформировать полноценную научно-инновационную экосистему на основе партнёрства науки, образования и бизнеса.

В 2013 г. в результате реорганизации академический сектор как самостоятельный сектор российской науки был упразднён, однако ведущая роль РАН в области фундаментальных исследований сохранилась.

Передовые российские вузы позиционируются сегодня не только как центры развития науки и образования, но и как основные драйверы научно-технологического и инновационного развития страны. Такие амбициозные задачи пока ещё во многом недостижимы, поскольку вузовский сектор науки серьёзно уступает другим научным секторам как по численности исследователей, так и по объёмам выполнения НИОКТР.

## ВУЗЫ И ВЫПОЛНЕНИЕ НИОКТР

**Вовлечённость вузов в проведение НИОКТР.** Сегодня почти все российские вузы, независимо от их типа и статуса, занимаются исследованиями и разработками. Если в 2010 г. таких высших учебных заведений было меньше половины (46.4%),

то в 2019 г. уже 83.3%, то есть 603 из 724 вузов выполняли НИОКТР [4].

В штатные расписания вузов включены должности как педагогических, так и научных работников [5]. И те и другие имеют статус научно-педагогических работников и обязаны формировать у обучающихся профессиональные качества по избранной профессии, а также развивать у молодого поколения самостоятельность, инициативу и творческие способности. На научных работников распространяются как нормы законодательства о науке, так и нормы образовательного законодательства. Зачастую один и тот же сотрудник в рамках внутреннего совместительства занимает обе должности одновременно.

О степени участия высших учебных заведений всех категорий в проведении НИОКТР свидетельствуют данные опроса руководителей 1526 структурных подразделений вузов, проведённого Национальным исследовательским университетом “Высшая школа экономики” (далее — НИУ ВШЭ) в 2020/2021 учебном году [6, с. 5]. Согласно его результатам, почти все научные, научно-образовательные и образовательные подразделения вузов (92.3% подразделений) выполняли НИОКТР [6, с. 7], привлекая к научно-исследовательской работе студентов и аспирантов (90.9% подразделений) [6, с. 13]. Для одной пятой (18.3%) организационных единиц научно-исследовательская деятельность была основной, почти половина (47.1%) занималась и научной и образовательной деятельностью одновременно, лишь треть проводила НИОКТР эпизодически [6, с. 7].

Важно отметить, что в западных странах далеко не все вузы реализуют НИОКТР, а основой формирования исследовательских компетенций, в том числе и студентов исследовательских вузов, является проектная и учебно-исследовательская деятельность. Например, в университете Плимута, который является одним из самых титулованных исследовательских университетов Великобритании, студенческие научные работы обычно осуществляются в рамках учебных программ [7]. Проектно-ориентированное обучение через реализацию индивидуальных или коллективных студенческих проектов позволяет студентам познакомиться со сложностью профессионального мира [8, с. 6]. Этот компонент подготовки студентов, как нам представляется, необходимо усиливать и в российской системе высшего образования.

Совмещение научной и образовательной деятельности — достаточно сложная задача даже для учёных западных исследовательских университетов, по мнению которых сегодня требуется “быть искусными в многозадачности или быть кем-то вроде пятиногой овцы”; “довольно мало учёных, способных работать в режиме многозадачности и

**Таблица 1.** Структура внутренних затрат на НИОКТР по секторам науки, % общего объёма внутренних затрат на НИОКТР в стране

| Страна                 | Выполнение НИОКТР, %       |                        |                            |                                   |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|                        | Предпринимательский сектор | Государственный сектор | Сектор высшего образования | Сектор некоммерческих организаций |
| США (2019)*            | 74.5                       | 9.7                    | 11.7                       | 4.1                               |
| Китай (2019)*          | 76.4                       | 15.5                   | 8.1                        | NA                                |
| Япония (2019)*         | 79.2                       | 7.8                    | 11.7                       | 1.3                               |
| Германия (2019)*       | 68.9                       | 13.7                   | 17.4                       | NA                                |
| Южная Корея (2019)     | 80.3                       | 10.0                   | 8.3                        | 1.4                               |
| Франция (2019)*        | 65.8                       | 12.4                   | 20.1                       | 1.8                               |
| Индия (2018)*          | 36.8                       | 56.1                   | 7.1                        | 0.0                               |
| Великобритания (2019)* | 66.6                       | 6.6                    | 23.1                       | 2.3                               |
| <b>Россия (2015)**</b> | <b>59.2</b>                | <b>31.1</b>            | <b>9.6</b>                 | <b>0.1</b>                        |
| <b>Россия (2021)**</b> | <b>57.8</b>                | <b>31.4</b>            | <b>10.2</b>                | <b>0.7</b>                        |

*Источники:* \* Cross-National Comparisons of R&D Performance. Comparisons of the Composition of Country R&D Performance and Funding. Table RD-7. National Science Foundation. <https://www.ncses.nsf.gov/pubs/nsb20225/recent-trends-in-u-s-r-d-performance>

\*\* Рассчитано ИПРАН РАН по данным Федеральной службы государственной статистики: сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 — наука), табл. t4\_sd\_p (2015 г.), табл. 46\_сектор\_p (2021 г.). <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

добиваться высоких результатов при выполнении широкого круга задач” [9]. Поэтому для осуществления педагогической и научной деятельности предлагается нанимать сотрудников на разные должности.

**Внутренние затраты на НИОКТР** вузовского сектора увеличились за последние 15 лет почти в 10 раз, за последние 6 лет — почти в полтора раза, с 13.3 млрд руб. в 2005 г., 87.7 млрд руб. в 2015 г. до 132.1 млрд руб. в 2021 г. [10, с. 36; 11, с. 58; 12, с. 60]. В 2021 г. сектор высшего образования выполнил 10.2% общего объёма НИОКТР в стране, на долю предпринимательского сектора пришлось 57.8%, государственного сектора — 31.4% (табл. 1). За период с 2015 по 2021 г. вузовский сектор и сектор некоммерческих организаций (далее — сектор НКО) увеличили долю выполняемых НИОКТР в общем объёме НИОКТР на 0.6 п.п. каждый, при этом доля предпринимательского сектора сократилась на 1.4 п.п. (Под выполнением НИОКТР (R&D performance) подразумевается объём внутренних затрат на НИОКТР.)

По удельному весу внутренних затрат на НИОКТР относительно общего объёма таких внутренних затрат российский сектор высшего образования опережает аналогичные показатели Китая, Южной Кореи и Индии (табл. 1). Сравнительно низкая доля выполняемых китайскими ву-

зами НИОКТР обусловлена, по мнению американских исследователей, ограничением интеллектуальной свободы в вузовской среде, а также тем, что образовательный процесс здесь ориентирован прежде всего на трудоустройство выпускников, а не на выпуск научной продукции [13].

Отдавая предпочтение собственной модели развития вузовской науки, Китай не стремится искусственно наращивать объёмы тех или иных научных секторов экономики, что представляется вполне обоснованным. При этом страна занимает второе место по доле в мировых расходах на НИОКТР (22% мировых НИОКТР) [14]. За период с 2000 по 2019 г. страны Восточной, Юго-Восточной и Южной Азии увеличили совокупную долю выполняемых НИОКТР в мировом объёме с 25 до 39%, в то время как доля США и ЕС-27 снизилась с 37% до 28% и с 22% до 18% соответственно.

**Источники финансирования НИОКТР вузовского сектора.** В структуре источников финансирования внутренних затрат на НИОКТР российского вузовского сектора преобладают средства государства (58.3% в 2021 г.), почти треть составляют средства предпринимательского сектора (28.4%) и десятую часть (11.3%) — собственные источники финансирования (рис. 1).



**Рис. 1.** Соотношение источников финансирования внутренних затрат на НИОКТР российского (2015–2021) и американского вузовского секторов (2019), %

*Данные по России:* рассчитано ИПРАН РАН по данным Федеральной службы государственной статистики. Сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 – наука), табл. t7\_sd\_п (2015 г.), табл. 7\_сектор\_п (2021 г.). <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

*Данные по США:* рассчитано ИПРАН РАН по данным Национального научного фонда США. Recent Trends in U.S. R&D Performance. Performers of R&D. Table RD-3 (2019). National Science Foundation. <https://www.ncses.nsf.gov/pubs/nsb20225/recent-trends-in-u-s-r-d-performance>

Примечательно, что доля средств бизнеса в структуре финансирования НИОКТР американских вузов почти в 4.5 раза меньше, в то время как доля средств некоммерческих организаций приблизительно в 10 раз больше и примерно в 2.4 раза весомее доля собственного финансирования НИОКТР (рис. 1). Вероятно, это объясняется большей нацеленностью американских вузов на проведение фундаментальных исследований, 48% от общего объема которых реализуется именно вузовским сектором [15].

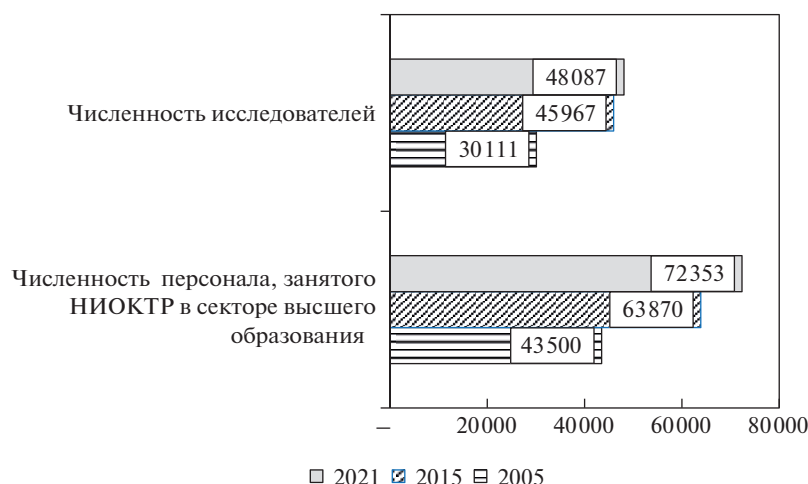
По данным социологического опроса руководителей структурных подразделений российских вузов [6, с. 18], основными источниками финансирования российской вузовской науки сегодня являются:

- гранты государственных научных фондов (50.5%);
- внутренние гранты и конкурсы вуза (44.1%);
- контракты/заказы российских компаний, в том числе госкорпораций (37.7%);
- государственное задание (34.9%);
- гранты Президента РФ и Правительства РФ (28.4%);
- субсидии в рамках госпрограмм, отраслевых федеральных программ (22.3%);
- гранты зарубежных фондов и международных организаций, контракты/заказы зарубежных компаний (9.1%);
- гранты негосударственных российских фондов (6.9%).

Отечественные коммерческие организации являются постоянными заказчиками услуг российских вузов [6, с. 28].

Следует отметить, что уровень удовлетворённости работодателей профессиональными знаниями и навыками выпускников российских вузов остаётся достаточно низким. Так, по данным опроса службы исследований платформы онлайн-рекрутинга “HeadHunter”, подавляющее большинство компаний (93%) оценило уровень профессионализма выпускников российских вузов как средний и ниже среднего [16]. Диплом определённого вуза был важен лишь для 41% респондентов. При этом российские работодатели обращают внимание не столько на наличие профессионального опыта выпускников, сколько на их некогнитивные и когнитивные навыки, формируемые в том числе в процессе учёбы в вузе. Для 74% опрошенных важнее всего были личностные компетенции и деловые качества выпускников, для 45% – наличие у них профессионального опыта, 34% обращали внимание на уровень и качество образования [17].

**Виды выполняемых работ.** Как свидетельствуют статистические данные и результаты социологического опроса НИУ ВШЭ, российская вузовская наука сосредоточена главным образом на проведении прикладных исследований. Согласно статистике, в 2021 г. примерно половина (48.3%) текущих внутренних затрат вузовского сектора на НИОКТР приходилась на прикладные исследования, приблизительно две пятых (38.7%) – на



**Рис. 2.** Динамика численности персонала (в том числе исследователей), занятого НИОКР, в секторе высшего образования, 2005–2021 гг., человек  
 Источники: [10, с. 60; 11, с. 58; 12, с. 36]

фундаментальные исследования и 12.9% — на опытно-конструкторские разработки<sup>1</sup>. Удельный вес расходов на фундаментальные исследования в структуре внутренних текущих затрат вузов на НИОКР увеличился за последние шесть лет на 9.3 п.п., а доля затрат на опытно-конструкторские разработки, напротив, снизилась на 9.1 п.п. Сектор некоммерческих организаций, который сегодня специализируется в основном на фундаментальных исследованиях, увеличил долю этого вида работ в структуре затрат на НИОКР сразу на 39 п.п., однако его вклад в реализацию исследований и разработок остаётся незначительным и составляет менее 1% общего объёма НИОКР в стране (табл. 1).

По результатам социологического опроса, все подразделения вузов, как научные, так и образовательные, выполняли все виды работ одновременно, но в значительно большей степени — прикладные НИОКР. Так, 77.8% из них занимались прикладными НИОКР и примерно половина (48%) — фундаментальными исследованиями [6, с. 22]. Среди научных подразделений 83.7% выполняли прикладные исследования, 65.3% — фундаментальные, 41.9% — экспериментальные разработки. Примерно 80% научно-образовательных организационных единиц реализовывали прикладные НИОКР, 46.2% — фундаментальные исследования и 26.6% — экспериментальные разработки. Образовательные подразделения вузов участвовали в выполнении всех видов иссле-

дований наравне с научными и научно-образовательными подразделениями. Из них 72.2% были задействованы в осуществлении прикладных исследований, 41.3% — фундаментальных, 25.3% — в экспериментальных разработках.

### КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Численность исследователей в вузах, как и численность научного персонала вузовского сектора, увеличилась за последние 15 лет почти в 1.6 раза (рис. 2). За период с 2015 по 2021 г. исследователей в вузовской науке стало больше на 4.6%. При этом в российской науке в целом, в том числе в государственном и предпринимательском секторах, численность исследователей, напротив, существенно сократилась — на 10.3%, 14.5% и 11.6% соответственно (рис. 3). Увеличилась доля вузовских исследователей в возрастных группах 30–39 лет (на 1.3 п.п.), 40–49 лет (на 3.6 п.п.), а также от 70 лет и старше (на 1.5 п.п.) на фоне сокращения доли молодёжи в возрасте до 29 лет (на 3.7 п.п.)<sup>2</sup>. В российской науке в целом удельный вес исследователей в возрасте до 29 лет сократился ещё значительно — на 4.5 п.п.

Снижение удельного веса самой многочисленной когорты (в возрасте до 29 лет) в возрастной структуре российских исследователей, возможно, связано с миграционными намерениями и поиском молодёжью более высокооплачиваемой и престижной работы. Так, по данным социологического опроса выпускников естественно-науч-

<sup>1</sup> Рассчитано ИПРАН РАН по данным Росстата. Сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 — наука), табл. t9b\_okved\_p (2015 г.), табл. 4\_2\_сектор\_п (2021 г.). <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

<sup>2</sup> Рассчитано ИПРАН РАН по данным Росстата. Сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 — наука), табл. t3\_sd\_p (2015 г.); табл. 3\_сектор\_пт (2021 г.). <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>



**Рис. 3.** Динамика численности исследователей по секторам, 2005–2021 гг., человек  
Источники: [10, с. 60; 11, с. 58].

ных факультетов ведущих российских вузов, проведённого в 2008 г. Центром исследований и статистики науки Минобрнауки России, лишь 36% респондентов определённо связывали свою жизнь и работу с Россией, а более половины (55%) хотели бы использовать появившиеся возможности работы за рубежом [18, с. 119]. Причина таких умонастроений, по мнению российских выпускников, — непрестижность и низкая оплата научного труда в России [18, с. 122, 123].

Примечательно, что предпринимательский сектор и сектор некоммерческих организаций оказываются успешнее вузов в привлечении молодых исследователей. Сегодня, как и шесть лет назад, здесь больше доля исследователей в возрасте до 29 лет, как и доля учёных моложе 39 лет (рис. 4).

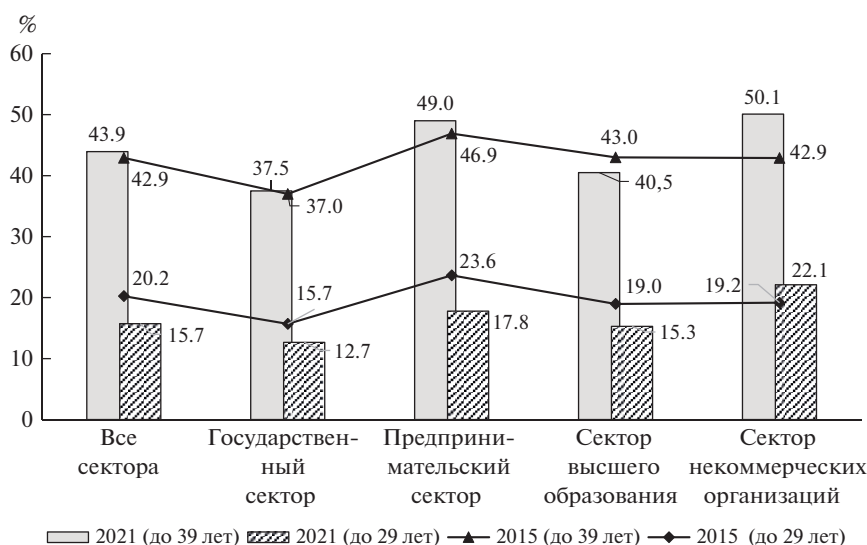
Следует отметить, что несмотря на повышающую динамику (с 13.2% в 2015 г. до 18.5% в 2021 г.) удельный вес российских исследователей в возрасте 40–49 лет значительно ниже аналогичных показателей в СССР (34.3%) и США (30.7%)<sup>3</sup>. Можно предположить, что учёные зрелого возраста уходят из науки в том числе и потому, что у нас определёнными предпочтениями в области

грантового финансирования или трудоустройства пользуются в основном исследователи в возрасте до 39 лет. Например, важным требованием реализации многих научных проектов является обеспечение определённой доли участников в возрасте до 39 лет, а необходимым условием функционирования молодёжных лабораторий в научных организациях и вузах — трудоустройство в них не менее 2/3 исследователей не старше 39 лет под руководством молодых перспективных учёных [19]. За период с 2019 по 2022 г. в России было создано 740 таких лабораторий.

Относительно низкий (5.5%), по сравнению с современными российскими показателями (24%), удельный вес учёных старше 60 лет в возрастной структуре советской науки, по-видимому, напрямую связан с достаточно высоким по тем временам уровнем пенсионного обеспечения учёных. Кроме того, многих учёных пенсионного возраста приглашали на высокие административные посты, не связанные с научной деятельностью. В СССР пенсии научным работникам выплачивались в размере 40% должностного оклада, но с учётом предельных размеров окладов в зависимости от занимаемой должности [20, с. 9]. При этом средний размер заработной платы научных работников составлял 150% от средней по стране. Таким образом, средний размер пенсии учёных был существенно выше прожиточного минимума, причём её рост коррелировал с ростом средней зарплаты.

Относительно ранний уход из науки американских исследователей (среди них люди старше 60 лет составляют всего 5.8%) обусловлен в том числе возрастными предубеждениями американских и европейских политиков [21, 22]. Западные

<sup>3</sup> Данные по России (2015–2021): рассчитано ИПРАН РАН по данным Федеральной службы государственной статистики. Сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 — наука), табл. t3\_sd\_p (2015 г.); табл. 3\_сектор\_пт (2021 г.). <https://rosstat.gov.ru/statistics/science> Данные по СССР (1983): Шенелев Г.В. Динамика численности кадров науки при переходе от СССР к Российской Федерации. Управление наукой: теория и практика. Т. 2. № 4. 2020. С. 184. Данные по США (2014): Миндели Л.Э., Чистякова В.Е. Структура и динамика кадрового потенциала российской науки. М.: ИПРАН РАН, 2016. <https://issras.ru/publication/docs/str2016.pdf>. С. 21.



**Рис. 4.** Распределение исследователей в возрастных группах до 29 лет (включительно) и до 39 лет (включительно) по секторам науки, 2015–2021 гг., %

*Источник:* рассчитано ИПРАН РАН по данным Федеральной службы государственной статистики. Сведения о выполнении научных исследований и разработок (итоги стат. наблюдения по форме № 2 — наука), табл. t3\_sd\_п (2015 г.); табл. 3\_сектор\_пт (2021 г.). Росстат. <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

университетские учёные всё чаще говорят о необоснованной дискриминации по возрасту, приводя результаты новейших исследований, которые опровергают расхожее мнение о снижении качества исследований с возрастом. По их мнению, “ключом к научной продуктивности является не возраст, а мотивация и способности” [21]. Можно предположить, что возрастная дискриминация во многом связана с присущим более старшим поколениям учёных культурным и политическим консерватизмом, который идёт вразрез с либеральным мейнстримом западной вузовской науки. Неслучайно тема либерального крена в системе высшего образования стала сегодня одной из самых актуальных в западном дискурсе.

Комментируя исследования коллег о воздействии образования на мировоззренческие установки студентов и выпускников, британские социологи отмечают, что в последние годы общественность всё более критично относится к высшему образованию, которое, как предполагается, навязывает студентам “левые программы” и “либеральное безумие” [23]. Данные их опроса показывают, что “выпускники британских вузов стали немногим более одной двадцатой шкалы либеральнее в культурном отношении, чем те, кто не получил высшего образования”. По оценкам аналитиков Американского института предпринимательства, опросы американских студентов, преподавателей и администраторов позволяют говорить о явном либеральном перекосе американской системы высшего образования [24].

Конечно, определить, какой должна быть “нормальная” возрастная структура научной сферы, достаточно сложно. Главные критерии привлечения и удержания кадров в науке — их мотивация, способности и научные результаты. Искусственная подгонка возрастных показателей к некому оптимальному уровню, как и использование ничем, кроме возраста, не обоснованных предпочтений или барьеров, негативно сказывается не только на мотивации учёных, но и на развитии научной сферы в целом. Совершенствование системы государственного стратегического планирования путём более широкого включения научной компоненты в экономическую систему страны, безусловно, повысит привлекательность научной карьеры для всех возрастных категорий исследователей.

## РАЗВИТИЕ ИНСТИТУТА АСПИРАНТУРЫ

В Послании Федеральному Собранию от 21 февраля 2023 г. Президент России В.В. Путин предложил вернуться к традиционной подготовке специалистов с высшим образованием, со сроком обучения от четырёх до шести лет, а также выделить аспирантуру в отдельный уровень профессионального образования. Соответствующий указ был подписан Президентом страны 12 мая 2023 г. [25]. Этой инициативе предшествовали изменения законодательства, направленные на усиление научной компоненты аспирантских программ.

До вступления в силу Приказа Минобрнауки России от 20.10.2021 № 951 [26] программы аспи-

рантур фокусировались на образовательных модулях, а не на научной работе аспирантов [27], несмотря на то, что обучение в аспирантуре по своей сути является первым этапом научной карьеры. Создание специализированных полномасштабных учебных подразделений в научных организациях зачастую оказывалось затруднительным, поэтому их участие в подготовке научных кадров пока ещё является ограниченным. Вместе с тем аспирантура остаётся основным источником воспроизводства научных кадров, в том числе и для Российской академии наук.

Подготовка аспирантов осуществляется главным образом в вузовском секторе. Так, доля вузовских аспирантов в общей численности аспирантов страны составляла в 2020 г. 85.6%, аспирантов НИИ — лишь 13.5%<sup>4</sup>. В динамике доля аспирантов, подготовленных в вузах, за период с 2015 по 2020 г. снизилась на 3.4 п.п., а подготовленных в НИИ, напротив, возросла на 3 п.п. Удельный вес защитивших диссертации в общей численности завершивших обучение в вузовских аспирантурах составил в 2020 г. лишь 8.9%, чуть выше процент защитившихся в аспирантурах НИИ (9.3%). При этом доля защитившихся в вузовских аспирантурах снизилась за последние пять лет на 9.9 п.п., доля защитившихся в НИИ — на 2.2 п.п.

Следует отметить, что сегодня во многих вузах созданы благоприятные условия для подготовки научно-педагогических кадров, налажена система отбора наиболее перспективных кандидатов для работы в вузах, позволяющая “постепенно, поэтапно формировать преподавателя высшей школы под контролем научных руководителей, заведующего кафедрой и ведущей профессуры” [28, с. 118]. Такой отбор зачастую начинается уже в магистратуре.

В некоторых вузах реализуются программы преддокторантуры, предусматривающие годовое трудоустройство исследователей со степенью кандидата наук на должности старших научных сотрудников (доцентов); такие программы, по мнению руководства вузов, намного эффективнее грантовых программ. Их финансирование осуществляется за счёт бюджета, однако могут использоваться и иные источники финансирования. В ряде вузов созданы фонды поддержки молодых преподавателей и учёных, привлекающие в том числе и средства бизнеса. Положительный опыт передовых вузов в отборе наиболее мотивированных и перспективных кадров особенно актуален для Российской академии наук, остро

нуждающейся сегодня в развитии системы воспроизводства собственного кадрового потенциала.

## МИРОВЫЕ И РОССИЙСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Болонский процесс и вузовская наука.** Реформирование российской системы высшего образования, включая вузовский сектор науки, на протяжении последних десятилетий было связано с реализацией принципов Болонского процесса, направленных на установление единых стандартов обучения, академическую мобильность студентов, преподавателей и исследователей, развитие международной интеграции и интернационализации высшего образования. В российских вузах были созданы все условия для развития международной мобильности студентов и научно-педагогических работников, которая стала одним из показателей эффективности деятельности высших учебных заведений.

Для России в этот период “наиболее актуальными направлениями интернационализации высшего образования являлись: увеличение доли иностранных учащихся в вузах; привлечение зарубежных преподавателей и исследователей; повышение доли и роли международной кооперации учёных и интернациональное воспитание” [29, с. 35, 36]; “происходило неявное стимулирование притока в Россию иностранных студентов с низким уровнем знаний” [30, с. 38].

Следует отметить, что Болонский процесс предполагает не столько адаптацию образовательных инноваций, которые могут быть реализованы и без присоединения к этой структуре, сколько “преодоление препятствий создания Европейского пространства высшего образования” [31] в целях “принятия системы легко понимаемых и сопоставимых степеней для содействия трудоустройству европейских граждан и международной конкурентоспособности европейской системы высшего образования” [32]. То есть базовые принципы Болонского процесса не только не учитывают интересы нашей страны, но во многом им противоречат.

Научные исследования, проводимые российскими университетами в рамках международных программ Европейского союза “Эразмус+”, по замыслу европейских политиков являются “ключом к продвижению общих европейских ценностей, укреплению межкультурного взаимопонимания” ввиду того, что “Европе нужны более сплочённые и инклюзивные общества, позволяющие гражданам играть активную роль в демократической жизни” [33, с. 5]. Главное условие реализации международных проектов “Эраз-

<sup>4</sup> Рассчитано ИПРАН РАН по данным Федеральной службы государственной статистики. Основные показатели подготовки кадров высшей квалификации, научных кадров в докторантуре по РФ, 2010–2020 гг. <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

мус+” — широкое распространение их результатов.

В апреле 2022 г. Болонская группа объявила о прекращении представительства России во всех структурах Болонского процесса. Как отмечается на сайте Европейской комиссии Европейского союза (далее — ЕК ЕС), Болонский процесс, обеспечивая форум для диалога “с соседними странами по реформам высшего образования и вопросам, связанным с общими академическими принципами, такими как независимость университетов и участие студентов в деятельности гражданского общества... стал важным пространством для мягкой дипломатии с соседними странами на Западных Балканах (за исключением Косово), странами Восточного партнёрства, Турцией и Россией, а также многими другими” [31]. Таким образом, Болонский процесс во многом рассматривается европейскими политиками в качестве внешнеполитического инструмента мягкой силы для продвижения собственных ценностей и интересов, а также привлечения талантливой молодёжи из других стран на европейский рынок труда.

Ориентация в последние десятилетия российского высшего образования на интеграцию с единым европейским образовательным пространством и рынком труда в какой-то степени не позволяла в полной мере достичь большей согласованности и единства отечественного образования, науки и производства. Общеизвестно, что эффективность деятельности российских вузов зачастую оценивалась на основе зарубежных рейтингов. Позиции отечественных вузов в таких международных рейтингах, как QS World University Rankings или Times Higher Education во многом зависели от их репутации среди зарубежных работодателей. По мнению учёных Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (далее — РАНХиГС), деятельность вузов по попаданию в мировые рейтинги университетов в значительной мере являлась “виртуальной игрой” [34, с. 47]. Процветала индустрия научного начётничества с использованием услуг коммерческих контор по размещению статей преподавателей и научных сотрудников в журналах, индексируемых в базах данных РИНЦ, WoS или Scopus, а также выдача свидетельств о выступлении на международных конференциях и о публикации тезисов докладов в сборниках по итогам таких конференций [34, с. 43, 44].

Система “интернационального воспитания” в русле реализации культурологической и структурной моделей формирования европейской идентичности во многом противостояла отечественным принципам воспитания, которые предполагают развитие высоких духовно-нравственных качеств личности, укрепление общероссий-

ской гражданской идентичности и гражданского единства. Сегодня в России усиливается акцент на гражданско-патриотическое и духовно-нравственное воспитание молодёжи в интересах страны и её граждан. Однако воспитательная работа проводится у нас главным образом в рамках внеурочной и внеучебной деятельности, в отличие от практики европейских стран, где воспитательные технологии социально-эмоционального обучения интегрированы почти в каждое занятие в рамках как школьного, так и вузовского образования.

В странах ЕС система высшего образования, включая вузовский сектор науки, выполняет прежде всего воспитательную миссию в духе присущих западным странам идеологии и ценностей. Ведь именно выпускники вузов вливаются в управленческую элиту, от мироощущения и умонастроения которой зависят судьбы народов и государств.

Так, в рамках “Европейской стратегии университетов” ЕК ЕС три из четырёх основных ключевых целей деятельности европейских вузов имеют непосредственное отношение к формированию европейской цивилизационной идентичности и мировоззрения, а именно [35]:

- укрепление европейского измерения в высшем образовании и исследованиях в рамках продвижения европейского подхода в высшем образовании;
- поддержка университетов ЕС как “маяков европейского образа жизни” во взаимосвязи с поощрением разнообразия и инклюзивности, продвижением и защитой демократических практик, прав и академических ценностей;
- утверждение университетов в качестве “движущей силы лидерства Европы и её глобальной роли”.

В документе предлагается отслеживать карьеру выпускников европейских вузов в целях лучшей сопоставимости результатов обучения. Иными словами, показатели эффективности трудоустройства выпускников европейских вузов рассматриваются в качестве результатов обучения и индикаторов эффективности деятельности высших учебных заведений.

Нельзя не отметить, что крайне важной и нерешённой остаётся у нас проблема несоответствия структуры подготовки кадров в вузах текущей и перспективной отраслевой специализации российской экономики [36, с. 13]. На уровне вузов это во многом обусловлено стремлением их руководства ориентироваться в первую очередь на текущий спрос, а не на подготовку востребованных региональной экономикой специалистов [36, с. 29, 30]. Такая ситуация отчасти стала следствием вхождения отечественной системы высшего образования в Болонский процесс.

**Оценка результативности научного сектора.** Новым трендом научной политики ЕС является пересмотр системы оценки результативности научных исследований, что, на наш взгляд, актуально и для российской науки. Согласно обзорному отчёту ЕК ЕС “На пути к реформе системы оценки научных исследований” (2021), в действующей системе часто используются неподходящие методы, а доминирующими показателями остаются количество публикаций в журналах с высоким импакт-фактором и их цитируемость [37, с. 3]. Однако уже сегодня многие организации, как финансирующие, так и реализующие НИОКТР, предпринимают шаги по улучшению методов оценки исследований и разработок, но прогресс в этой области медленный, неравномерный и фрагментарный.

Речь идёт о реформировании всей системы оценки научных исследований, включая оценку деятельности отдельных учёных, научных заявок и проектов, исследовательских групп, а также научных институтов, которая должна стимулировать к проведению более качественных и результативных исследований [37, с. 3, 4]. Указывается, что необходимо учитывать разнообразие как дисциплин, от направлений STEM (естественные науки, технология, инженерия и математика) до социальных и гуманитарных наук, так и исследовательских организаций, институциональных миссий, культур и стран, а также потенциальное влияние научных исследований на общество [37, с. 5]. Как предполагается, оценка должна опираться на качественные суждения, когда центральное место отводится экспертным заключениям, подкреплённым количественными показателями, где это уместно [37, с. 9, 10]. Такая позиция представляется важной и для вузовского сектора российской науки, в оценке деятельности которого следует опираться не столько на показатели публикационной и патентной активности научно-педагогических работников, сколько на качество проектирования и реализации образовательных программ, а также показатели эффективности трудоустройства выпускников.

**Категории университетов.** В странах Евросоюза различают университеты прикладных наук и исследовательские университеты [38]. Первые готовят к трудовой деятельности в рамках определённой профессии [39], вторые предлагают студентам исследовательские программы в академической среде [38]. Как правило, только исследовательские университеты присуждают докторские степени [40]. Вузовский сектор науки ЕС выполняет 80% всех европейских фундаментальных исследований [41].

Университеты прикладных наук обычно не присутствуют в мировых рейтингах, поскольку не соответствуют критериям отбора, связанным с

проведением научных исследований [42]. Такие университеты (они также называются профессиональными университетами, технологическими институтами или политехническими школами) появились на несколько веков позже классических университетов [43]. Они изначально развивались с акцентом на взаимодействие с бизнесом, в отличие от классических университетов, специализировавшихся на фундаментальных исследованиях [44, с. 11]. Сегодня многие университеты прикладных наук стали включать в свои стратегии концепцию предпринимательского университета [45, 46]. При этом если в конце XX в. деятельность прикладных университетов во многом была направлена на коммерциализацию академических знаний через научные парки и спин-офф фирмы, то сейчас всё больше внимания уделяется роли университетов как институциональных акторов в инновационных системах [44, с. 13]. Так, для реализации актуальных задач инновационного развития Европейского Союза создаются консорциумы с участием исследовательских университетов и университетов прикладных наук [47]. Продвижением сотрудничества и интеграции между высшим образованием, исследованиями и бизнесом для создания инновационных экосистем в ЕС занимается специально созданная для этих целей структура — Европейский институт инноваций и технологий [48]. Как представляется, формирование и развитие альянсов и консорциумов организаций науки, образования и бизнеса является актуальным и для нашей страны.

**В американской системе высшего образования** выделяют колледжи, университеты, а также исследовательские (докторские) университеты. Научные исследования и разработки реализуются лишь немногими “докторскими университетами” (doctoral universities) с участием постдокторантов и аспирантов, работающих чаще всего полный рабочий день, наравне с сотрудниками государственных лабораторий. По данным за 2021 г., американский вузовский сектор выполняет около половины (48%) всех фундаментальных НИОКТР в стране [15].

Как отмечается на сайте Национального научного фонда США [49], концентрация большей части академических НИОКТР в небольшом числе вузов — давняя тенденция. В 2019 г. из 4.4 тыс. высших учебных заведений страны менее 1 тыс. (23%) сообщили о расходах на НИОКТР. Из них более трёх четвертей всех академических НИОКТР (78%) осуществлял 131 докторский университет с очень высокой исследовательской активностью (по классификации вузов Карнеги), причём почти половину (46%) общего объёма университетских исследований выполнили всего 25 докторских университета. В докторских университетах с очень высокой исследовательской активностью

числятся или работают более 80% аспирантов (doctoral students) и постдокторантов по направлению S&E (наука и техника) [50]. Почти все академические постдокторские должности в США сосредоточены в докторских университетах с очень высоким уровнем исследований (83%), с высоким уровнем исследований (5%), а также в медицинских школах и центрах (10%) [51].

Основными целями деятельности американских исследовательских университетов являются: проведение научных исследований, подготовка кадров высшей квалификации и, в меньшей степени — реализация программ академического бакалавриата, имеющих существенные отличия от аналогичных программ других университетов [52]. При этом деятельность профессоров таких университетов нацелена главным образом на проведение НИОКТР.

**Российская система высшего образования** имеет свою специфику, хотя её реформа во многом опиралась на европейские образовательные традиции и опыт.

Сегодня структура системы высшего образования в России включает федеральные и исследовательские университеты, а также ведущие вузы с особыми статусами. *Федеральные университеты* призваны обеспечивать подготовку кадров для комплексного социально-экономического развития субъектов РФ. Деятельность *исследовательских университетов* направлена на кадровое обеспечение приоритетных направлений развития науки, технологий, техники, отраслей экономики, социальной сферы, а также на развитие и внедрение в производство высоких технологий. Деятельность и тех и других ориентирована в первую очередь на прикладную науку.

Сейчас на повестке дня формирование в России более 100 университетов, которые, как предполагается, станут двигателями научно-технологического и социально-экономического развития страны [19]. Такая задача поставлена в рамках стартовавшей в 2021 г. программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” нацпроекта “Наука и университеты”. Программа направлена на концентрацию ресурсов для обеспечения вклада российских вузов в достижение национальных целей развития и повышение научно-образовательного потенциала университетов и научных организаций.

Как нам представляется, с учётом поставленных задач и в условиях острой потребности российской науки в квалифицированных научных кадрах назрела необходимость создания на базе отделений и научных центров Российской академии наук исследовательских университетов, наделённых правом самостоятельной разработки стандартов и программ подготовки научных кадров высшей квалификации. Китайская академия

наук, имеющая в своей структуре три крупных дочерних исследовательских университета, является примером успешной интеграции науки и образования на базе научных организаций [53].

Учреждение исследовательских университетов под руководством РАН особенно актуально в связи с тем, что в отличие от западных стран, в России нет исследовательских университетов, которые специализировались бы в первую очередь на фундаментальной науке.

\*\*\*

Сегодня почти все российские вузы, независимо от их типа и статуса, реализуют НИОКТР, специализируясь главным образом на прикладных исследованиях. Деятельность исследовательских университетов также сосредоточена в основном на прикладной науке. В отличие от западных стран, в России нет университетов, которые занимались бы в первую очередь фундаментальными исследованиями. Представляется, что в условиях острой потребности российской науки в квалифицированных научных кадрах назрела необходимость создания на базе отделений и научных центров Российской академии наук исследовательских университетов, наделённых правом самостоятельной разработки стандартов и программ подготовки научных кадров высшей квалификации. Китайская академия наук, имеющая в своей структуре три крупных дочерних исследовательских университета, — пример успешной интеграции науки и образования на базе потенциала научных организаций.

По данным социологических опросов почти все научные, научно-образовательные и образовательные подразделения российских вузов выполняют НИОКТР, привлекая к научно-исследовательской работе студентов и аспирантов. Речь идёт об обеспечении широкого доступа молодому поколению к проведению научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, в том числе по заказу государства или бизнеса. По удельному весу внутренних затрат на НИОКТР относительно общего объёма таких внутренних затрат российский сектор высшего образования сегодня опережает аналогичные показатели Китая, Южной Кореи и Индии, а также существенно опережает США по доле средств бизнеса в структуре финансирования собственных НИОКТР.

Открытыми остаются вопросы, во-первых, обоснованности масштабов участия российских вузов и их подразделений в реализации НИОКТР, во-вторых, соотношения образовательной и научной деятельности вузов, то есть о возможности учебных заведений обеспечивать высокий уровень подготовки студентов в условиях, когда пре-

подаватели вынуждены совмещать образовательную деятельность с научной работой. Как представляется, эта проблема требует дальнейшего изучения и осмысления. Примечательно, что в США и странах ЕС далеко не все вузы выполняют НИОКР, а основой формирования исследовательских компетенций студентов является проектная и учебно-исследовательская деятельность. Как представляется, этот компонент подготовки студентов необходимо развивать и в российских вузах.

Воспроизводство кадрового потенциала российской науки подразумевает создание оптимальных условий для её функционирования в целях выполнения задач социально-экономического развития страны, в том числе для привлечения и удержания в науке мотивированных и талантливых исследователей, показывающих высокие научные результаты, независимо от их возраста. Достаточно сложно определить, каким образом должна выглядеть “нормальная” возрастная структура научной сферы, поскольку главными критериями привлечения и удержания исследователей должны быть их мотивация, способности и научные результаты. Искусственная подгонка возрастных показателей к некому оптимальному уровню, как и использование ничем, кроме возраста, не обоснованных предпочтений или барьеров негативно сказывается на развитии науки в стране.

Совершенствование системы государственного стратегического планирования на основе большего включения научного компонента в экономическую систему страны, безусловно, повысит привлекательность научной карьеры для всех категорий исследователей. Эффективным инструментом реализации актуальных задач социально-экономического развития страны могут стать альянсы и консорциумы организаций науки, образования и бизнеса.

Что касается системы оценки научных исследований, включая оценку деятельности отдельных учёных, научных заявок и проектов, исследовательских групп, а также научных институтов, то сегодня в западных странах она подвергается существенному пересмотру. Наблюдается отход от диктата наукометрии в сторону экспертных оценок, которые подкрепляются ответственно используемыми количественными показателями с учётом разнообразия институциональных миссий и видов научной деятельности. Эта тенденция представляется важной и для вузовского сектора российской науки, в оценке деятельности которого следует опираться не столько на показатели публикационной и патентной активности научно-педагогических работников, сколько на качество проектирования и реализации образова-

тельных программ, а также показатели эффективности трудоустройства выпускников.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов Я., Юдкевич М. Университеты в России. Как это работает. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2021.
2. Кузьминов Я., Юдкевич М. Наука в вузах России: история изгнания и возвращения // Эконс/Econs. 31.08.2021. <https://econs.online/articles/bookshelf/nauka-v-vuzakh-rossii-istoriya-izgnaniya-i-vozvrashcheniya/?ysclid=li8l2qzpb876718369>
3. Дежина И. Реформа РАН: причины и последствия для науки в России // Russie. Nei. Visions. 2014. Май. № 77. С. 1–29. [https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/ifri\\_rnv\\_77\\_ran\\_reforma\\_rus\\_dezhina\\_may\\_2014.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/ifri_rnv_77_ran_reforma_rus_dezhina_may_2014.pdf)
4. Вузовская наука в России и мире // Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. 13.05.2021. <https://issek.hse.ru/news/469127520.html>
5. Черных Н.В. Правовой статус научных работников в России и зарубежных странах // Актуальные проблемы российского права. 2019. № 7. С. 67–76. <https://doi.org/10.17803/1994-1471.2019.104.7.067-076>
6. Стрельцова Е.А., Репина А.А., Нестеренко А.В. Вузовская наука: барьеры и перспективы: информационный бюллетень. М.: НИУ ВШЭ, 2022. [https://www.hse.ru/data/2022/11/20/1712467888/ib\\_23\(40\)\\_2022.pdf](https://www.hse.ru/data/2022/11/20/1712467888/ib_23(40)_2022.pdf)
7. Research-informed teaching. University of Plymouth. <https://www.plymouth.ac.uk/about-us/teaching-and-learning/guidance-and-resources/research-informed-teaching>
8. Gueye M.L., Exposito E. University 4.0: The Industry 4.0 paradigm applied to Education // IX Congreso Nacional de Tecnologías en la Educación. Oct. 2020. P. 1–15. [https://www.researchgate.net/publication/344508737\\_University\\_40\\_The\\_Industry\\_40\\_paradigm\\_applied\\_to\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/344508737_University_40_The_Industry_40_paradigm_applied_to_Education)
9. Reymer I., Thune T. Task complementarity in academic work: a study of the relationship between research, education and third mission tasks among university professors // The Journal of Technology Transfer. 2023. V. 48. P. 331–360. <https://doi.org/10.1007/s10961-021-09916-8>
10. Наука, технологии и инновации России: 2022: крат. стат. сб. / В.П. Заварухин, О.А. Соломенцева, М.А. Солопова и др. М.: ИПРАН РАН, 2022.
11. Наука, технологии и инновации в России: крат. стат. сб. / Гл. ред. Л.Э. Миндели. М.: ИПРАН РАН, 2016.
12. Наука, технологии и инновации: крат. стат. сб. / Гл. ред. Л.Э. Миндели. М.: ИПРАН РАН, 2007.
13. Is China a Global Leader in Research and Development? // China Power project. Center for Strategic and International Studies. Updated January 28, 2021. <https://chinapower.csis.org/china-research-and-development-rnd/>

14. Research and Development: U.S. Trends and International Comparisons // National Science Foundation. 2022. <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20225>
15. Recent Trends in U.S. R&D Performance. Performers of R&D. Table RD-3 (2019) // National Science Foundation. 2022. <https://www.ncses.nsf.gov/pubs/nsb20225/recent-trends-in-u-s-r-d-performance>
16. Польза дипломов вузов — миф или реальность? Опрос работодателей // Служба исследований hh.ru, сентябрь, 2021 г. <https://hhcdn.ru/file/17145079.pdf>
17. На уровень и качество образования молодого специалиста обращает внимание только треть кадровиков // Superjob.ru. 30.07.2013. <https://russia.superjob.ru/research/articles/111280/na-uroven-i-kachestvo-obrazovaniya-molodogo-specialista-obraschaet-vnimanie-tolko-tret-kadrovikov/>
18. Зубова Л.Г., Андреева О.Н., Антропова О.А. Ориентации выпускников на научно-исследовательскую деятельность // Социологические исследования. 2008. № 11. С. 119—123.
19. Наука и университеты: главные достижения 2022 года // Наука.рф 28.12.2022. <https://xn--80aa3ak5a.xn--plai/journal/nauka-i-universitety-glavnye-dostizheniya-2022-goda/>
20. Зубова Л.Г., Антропова О.А., Римашевская Н.М. Пенсионное обеспечение научных работников: актуализация и возможности решения проблемы // Информационно-аналитический бюллетень ЦИСН. 2009. № 3. С. 1—66.
21. Stroebe W., Kell D., Donald A. et al. Are older academics past their productive peak? // THE — Times Higher Education. Insights and strategic consultancy. 2016. May 12. <http://awuc.misis.ru/are-older-academics-past-their-productive-peak/>
22. Marshall L. Does faculty productivity really decline with age? New study says no // University of Colorado Boulder. 2017. Oct. 17. 1. <https://www.colorado.edu/today/2017/10/17/does-faculty-productivity-really-decline-age-new-study-says-no>
23. Simon E. Demystifying the link between higher education and liberal values: A within-sibship analysis of British individuals' attitudes from 1994—2020 // The British Journal of Sociology. 2022. V. 73. Is. 5. December. P. 967—984. <https://doi.org/10.1111/1468-4446.12972>
24. Abrams S.J., Khalid A. Are Colleges and Universities Too Liberal? What the Research Says About the Political Composition of Campuses and Campus Climate // The American Enterprise Institute. 21. <https://doi.org/10.2020.https://www.aei.org/articles/are-colleges-and-universities-too-liberal-what-the-research-says-about-the-political-composition-of-campuses-and-campus-climate>
25. Указ Президента РФ от 12.05.2023 № 343 “О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования” // СПС КонсультантПлюс
26. Приказ Минобрнауки России от 20.10.2021 № 951 “Об утверждении федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учётом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов)” // СПС КонсультантПлюс
27. Иванов В.В., Маринина Р.А. Реформирование системы подготовки научных кадров высшей квалификации: проблемы и основные направления // Инновации. 2013. № 5 (175). С. 32—38. <https://cyberleninka.ru/article/n/reformirovanie-sistemy-podgotovki-nauchnyh-kadrov-vysshey-kvalifikatsii-problemy-i-osnovnye-napravleniya>
28. Романкова Л.И. Проблемы подготовки научных и научно-педагогических кадров и их мотивации к профессиональной деятельности в системе высшей школы // Подготовка научных кадров в системе высшего образования России. Сборник обзоров. Отв. ред. Ракитов А.И.; РАН ИНИОН. Москва, 2002. С. 109—135. <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-podgotovki-nauchnyh-i-nauchno-pedagogicheskikh-kadrov-i-ih-motivatsii-k-professionalnoy-deyatelnosti-v-sisteme-vysshey-shkoly>
29. Галичин В.А. Международный рынок образовательных услуг: основные характеристики и тенденции развития. М. Изд. дом “Дело” РАНХиГС, 2015. <http://www.ifap.ru/library/book559.pdf>
30. Клячко Т.Л., Синельников-Мурылев С.Г. Стратегия для России: образование. М.: 2018. <https://ifap.ru/library/book597.pdf>
31. The Bologna Process and the European Higher Education Area // European Commission, 2022. <https://education.ec.europa.eu/education-levels/higher-education/inclusive-and-connected-higher-education/bologna-process>
32. Bologna Declaration. 1999. [http://www.ehea.info/media.ehea.info/file/Ministerial\\_conferences/02/8/1999\\_Bologna\\_Declaration\\_English\\_553028.pdf](http://www.ehea.info/media.ehea.info/file/Ministerial_conferences/02/8/1999_Bologna_Declaration_English_553028.pdf)
33. Erasmus+ Programme Guide. Version 2 (2020): 26-02-2020. P. 1—331. [https://erasmus-plus.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-09/erasmus\\_programme\\_guide\\_2020\\_v2\\_en.pdf](https://erasmus-plus.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-09/erasmus_programme_guide_2020_v2_en.pdf)
34. Клячко Т.Л. Последствия и риски реформ в российском высшем образовании. М.: Дело, 2017. <http://www.ifap.ru/cfeoll/files/170213b.pdf>
35. Higher education initiatives. European Education Area // European commission. 2021. <https://education.ec.europa.eu/education-levels/higher-education/about-higher-education>
36. Блинова Т.Н., Федотов А.В., Коваленко А.А. Соответствие структуры подготовки кадров с высшим образованием потребностям экономики: проблемы и решения // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25. № 2. С. 13—33. <https://doi.org/10.15826/umpa.2021.02.012>
37. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Towards a reform of the research assessment system: scoping report. Publications Office, 2021. P. 1—25. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/707440>
38. Higher education in Europe // European commission. <https://education.ec.europa.eu/study-in-europe/planning-your-studies/higher-education-in-europe>

39. About Dutch universities // Studyinholland.co.uk. [https://www.studyinholland.co.uk/about\\_dutch\\_universities.html#:~:text=Research%20universities%20offer%20more%20academically,a%20particular%20career%20upon%20graduation](https://www.studyinholland.co.uk/about_dutch_universities.html#:~:text=Research%20universities%20offer%20more%20academically,a%20particular%20career%20upon%20graduation)
40. Universities of Applied Sciences and the Doctorate degree (Dr.) in Germany // MyGermanUniversity.com 2023. <https://www.mygermanuniversity.com/articles/universities-of-applied-sciences-and-the-phd>
41. The role of universities in the Europe of knowledge. EU Legislation, 2006. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/the-role-of-universities-in-the-europe-of-knowledge.html>
42. Universities in Germany: University vs University of Applied Sciences // German Educare. March 2023. <https://www.germaneducare.com/universities-in-germany-university-vs-university-of-applied-sciences/>
43. University of applied sciences – what is its profile and why to study there? // Master and more study portal. <https://www.master-and-more.eu/en/university-of-applied-sciences/>
44. Charles D., Ahoba-Sam R., Manrique S. Entrepreneurial Universities in Regional Innovation. RUNIN Project. UK Book Publishing, 2021. P. 1–334. <https://doi.org/10.31265/usps.82>
45. Sperrer M., Müller C., Soos J. The Concept of the Entrepreneurial University Applied to Universities of Technology in Austria: Already Reality or a Vision of the Future? // The Technology Innovation Management Review. October 2016. <https://timreview.ca/article/1026>
46. Entrepreneurial University – Häme University of applied sciences // Regional university network. 2023. <https://www.hamk.fi/entrepreneurial-university/?lang=en>
47. E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup> Alliance. The E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup> consortium. 2023. <https://www.entrenovators.eu/e3udres2-alliance/the-e3udres2-institutions>
48. The European Institute of Innovation and Technology (EIT). European Education Area. European Commission. <https://education.ec.europa.eu/education-levels/higher-education/innovation-in-education/european-institute-of-innovation-and-technology-eit?>
49. Financial Resources for Academic R&D. Academic R&D at Research Universities. National Science Foundation, 2021. <https://www.ncses.nsf.gov/pubs/nsb20213/financial-resources-for-academic-r-d#performance-of-academic-r-d>
50. Academic Research and Development. Executive Summary. National Science Foundation, 2021. <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb20213/executive-summary>
51. Education, Training, and Academic R&D. Financial Support for S&E Graduate Students and Postdocs. National Science Foundation, 2021. <https://www.ncses.nsf.gov/pubs/nsb20213/education-training-and-academic-r-d>
52. College and scholarship search platform. 2023 // Cappex. <https://www.cappex.com/articles/match-fit/what-is-a-research-university>
53. Profile. Chinese Academy of Science. [https://english.cas.cn/about\\_us/introduction/201501/t20150114\\_135284.shtml](https://english.cas.cn/about_us/introduction/201501/t20150114_135284.shtml)

## АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ: СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

© 2023 г. А. В. Семёнова<sup>a,\*</sup>, О. Б. Поповичева<sup>b,\*\*</sup>, Ю. А. Завгородняя<sup>a,\*\*\*</sup>, М. А. Чичаева<sup>a,\*\*\*\*</sup>,  
Р. Г. Ковач<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>, Н. Е. Кошелева<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>, Т. М. Минкина<sup>a,c,\*\*\*\*\*</sup>, Н. С. Касимов<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>b</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>c</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: AVSemyonova@mail.ru

\*\*E-mail: olga.popovicheva@gmail.com

\*\*\*E-mail: zyu99@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: shamora777@yandex.ru

\*\*\*\*\*E-mail: rkovach@yandex.ru

\*\*\*\*\*E-mail: natalk@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: tminkina@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: nskasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Изучение загрязнения атмосферы крупных городов полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) относится к приоритетным задачам оценки качества воздуха и экологических рисков для здоровья населения. Авторами проведён анализ химического состава аэрозолей, отобранных в весенний (2018), осенний и зимний (2019–2020) сезоны на Аэрозольном комплексе МГУ, который располагается на условно фоновой территории московского мегаполиса. Методами газовой хроматографии, масс-спектрометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии определены 16 приоритетных соединений ПАУ. Медианное значение суммарной концентрации 16 ПАУ ( $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$ ) увеличивается от весеннего сезона ( $1.43 \text{ нг/м}^3$ ) к осеннему ( $1.68 \text{ нг/м}^3$ ) и далее — к зимнему ( $2.47 \text{ нг/м}^3$ ). На основании диагностических отношений ПАУ определён доминирующий вклад транспорта, промышленных предприятий и отопительной системы в общий объём выбросов. Розы загрязнений указывают на расположение источников максимальных концентраций низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ. Выделяются эпизоды загрязнений: весной 2018 г. под воздействием переноса дымовых шлейфов сельскохозяйственных пожаров, осенью 2019 г. в результате петрогенных эмиссий и увеличения сжигания биомассы в жилом секторе вокруг Москвы. В зимний и осенний сезоны зафиксированы наибольшие значения канцерогенного (0.45 и 0.42) и мутагенного (0.58 и 0.55) эквивалентов по бенз(а)пирену в сравнении с весенним (0.26 и 0.38). Пожизненный риск развития рака лёгких, рассчитанный по данным за три сезона, составляет 0.5 случая на 1 млн человек.

**Ключевые слова:** загрязнение, атмосфера, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), московский мегаполис, токсикологические риски.

**DOI:** 10.31857/S0869587323070071, **EDN:** RQONHB

СЕМЁНОВА Арина Владиславовна — магистрант кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ПОПОВИЧЕВА Ольга Борисовна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова. ЗАВГОРОДНЯЯ Юлия Анатольевна — кандидат биологических наук, доцент кафедры химии почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. ЧИЧАЕВА Марина Александровна — научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. КОВАЧ Роман Геннадьевич — научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. КОШЕЛЕВА Наталья Евгеньевна — доктор географических наук, профессор кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. МИНКИНА Татьяна Михайловна — доктор биологических наук, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов ЮФУ. КАСИМОВ Николай Сергеевич — академик РАН, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) представляют собой группу устойчивых соединений, состоящих из двух и более конденсированных бензольных колец. В окружающей среде они накапливаются преимущественно в результате сжигания и переработки органического сырья. В организм человека ПАУ поступают в составе частиц вдыхаемой фракции, обуславливая значительную часть токсического действия дымовых аэрозолей [1]. Отмечается негативное воздействие этих веществ на нервную, сердечно-сосудистую, иммунную и гормональную системы человека [2]. Ряд индивидуальных соединений классифицированы как мутагенные (Regulation (EC) № 1272/2008), вызывающие изменения в генетическом материале, а также канцерогенные из-за способности провоцировать развитие злокачественных новообразований [3].

Из-за негативного воздействия на здоровье населения, высокой устойчивости и способности к накоплению в объектах окружающей среды соединения ПАУ подлежат контролю на национальном и международном уровне [4]. Для мониторинга качества воздуха выделены 16 приоритетных индивидуальных полиаренов: нафталин (НАФ), аценафтилен (АЦЕ), аценафтен (АЦН), флуорен (ФЛУ), фенантрен (ФЕН), антрацен (АНТ), флуорантен (ФЛР), пирен (ПИР), хризен (ХР), бензо(а)антрацен (БаА), бензо(к)флуорантен (БкФ), бензо(б)флуорантен (БбФ), бенз(а)пирен (БаП), дибенз(аh)антрацен (ДБА), бенз(ghi)перилен (БгП), индено(1,2,3-cd)пирен (ИсдП) [5]. Для бенз(а)пирена установлено значение предельно допустимой концентрации (ПДК) в воздухе  $0.001 \text{ мкг/м}^3$ . В зависимости от молекулярной массы полиарены разделены на группы: низкомолекулярные (НМПАУ, молекулярная масса 128–178 г/моль; 2- и 3-кольчатые НАФ, АЦЕ, АЦН, ФЛУ, ФЕН, АНТ), среднемолекулярные (СМПАУ, 202–228 г/моль; 4-кольчатые ФЛР, ПИР, ХР, БаА) и высокомолекулярные (ВМПАУ, более 228 г/моль; 5- и 6-кольчатые БкФ, БбФ, БаП, ДБА, БгП, ИсдП).

Для атмосферы густонаселённых областей характерны высокие концентрации ПАУ и их канцерогенные риски [6]. К пирогенным относятся источники сжигания ископаемого топлива (бензин, дизель, газ, уголь) в транспортных, промышленных и отопительных системах, а также органического сырья (растительная биомасса, мусор) в жилом секторе, к петрогенным — эмиссии при транспортировке, хранении и переработке нефтепродуктов [7]. В холодный сезон среди источников ПАУ доминируют выбросы отопительных систем [8], а в тёплый — лесные пожары и сельскохозяйственные палы [9]. Соотношения концентраций индивидуальных полиаренов широко используются при выявлении их источников [10].

Сезонная динамика химического состава аэрозолей определяется изменением вкладов источников эмиссий и метеорологическими условиями [6, 11]. Зимой содержание ПАУ в аэрозоле существенно возрастает из-за понижения температуры, увеличения объёмов выбросов отопительных систем и низкой фотохимической деградации [12]. В безветренную погоду концентрации могут достигать максимальных значений, превышающих ПДК [13]. На уровень загрязнения атмосферы городов также влияют локальные эмиссии и перенос воздушных масс из регионов [14]. В составе аэрозолей соединения ПАУ способны преодолевать сотни километров [15]. Фотоокислительная деградация ПАУ с низкой молекулярной массой происходит более интенсивно, что приводит к накоплению высокомолекулярных полиаренов в составе аэрозолей и увеличению дальности их переноса [16].

Зарубежные исследования происхождения и сезонной динамики ПАУ в странах Европы [17], Азии [11] и США [18] показывают сильно различающиеся уровни их концентраций: в азиатских городах, где в энергетике и жилом секторе используется в основном уголь, среднегодовые концентрации полиаренов выше, чем в европейских. Наиболее значительные уровни загрязнения наблюдаются в промышленных центрах, например, в Улан-Баторе (Монголия), в Иркутске (Россия) [6, 13].

Москва — крупнейший мегаполис Европы с высокой плотностью населения, развитой транспортной и промышленной инфраструктурой. Согласно оценке индекса качества воздуха в городе низкий уровень загрязнения [19]: среднегодовые концентрации твёрдых частиц диаметром менее  $10 \text{ мкм}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) составили  $29 \pm 20 \text{ мкг/м}^3$  в 2018 г. [20] и  $32 \pm 12 \text{ мкг/м}^3$  в 2019 г. [21], что ниже принятого в России норматива качества атмосферного воздуха (ПДК =  $60 \text{ мкг/м}^3$ ) городских и сельских поселений [22]. Анализ продуктов сжигания природных ископаемых топлив в составе аэрозолей указал на эмиссии транспорта, промышленности и системы отопления как основные источники загрязнения атмосферы [23, 24]. В осенний и зимний сезоны зарегистрирована большая доля выбросов от сжигания биомассы в жилом секторе Московской области, весной и летом — шлейфов сельскохозяйственных палов и лесных пожаров на территории европейской части России [25]. Стоит отметить, что в период локдауна во время пандемии COVID-19 наблюдалось улучшение качества воздуха в результате снижения экономической активности [26].

Аэрозольное загрязнение полиаренами в период с 29 апреля по 1 мая 2019 г. достигло  $5.5 \text{ нг/м}^3$  [23]: наиболее высокие значения по бенз(к)флуорантену, бензо(б)флуорантену и пирену говорили о вкладе эмиссий от сжигания ископаемого топ-

лива и горения биомассы [23]. Определён высокий уровень бенз(а)пирена в городской пыли в Москве, превосходящий фоновые значения, которые характерны для почв Мещерской низменности [26, 27]. Отсутствие сезонных наблюдений за уровнем аэрозольных загрязнений ПАУ в атмосфере и выявление степени их негативного влияния на здоровье населения обусловили необходимость длительных исследований состава аэрозолей и проведения оценки токсических рисков.

Данная работа посвящена исследованию аэрозольного загрязнения московского мегаполиса полициклическими ароматическими углеводородами. Представлены результаты измерений, выполненных на базе инструментального Аэрозольного комплекса МГУ в весенний 2018 г., осенний 2019 г. и зимний 2019–2020 гг. сезоны. На основании диагностических соотношений ПАУ идентифицированы основные их источники, проведены расчёты токсикологических рисков и рисков возникновения рака лёгких. Выявлены основные отличия аэрозольного загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами атмосферы Москвы от других крупных городов и промышленных центров.

**Измерительная кампания, место и метод отбора проб.** Москва с населением около 13.1 млн человек является одним из крупнейших городов мира. Она находится в центре Восточно-Европейской равнины, в зоне влажного умеренно континентального климата [28]. Масштабное дорожное строительство, развитие общественного транспорта, улучшение структуры автопарка и запрет на использование топлива ниже стандарта Евро-5 способствуют уменьшению выбросов автотранспорта, плотность которых не превышает 500 т/км<sup>2</sup>/год на 70% территории города [29]. В общем объёме промышленных эмиссий в Москве преобладают выбросы производств электроэнергии (около 50% всех загрязняющих атмосферу веществ), среди которых 50 нефтеперерабатывающих предприятий (НефтеСинтез, Московский нефтеперерабатывающий завод компании “Газпром нефть”, и др.), машиностроительных и мусоросжигательных заводов [30]. В Москве функционирует система центрального отопления, которая на 96.7% обеспечивается газом, что значительно снижает выбросы по сравнению с отопительными системами на твёрдых и жидких видах ископаемого топлива. Такая структура потребления топлива отличает Москву от многих городов Европы и Азии, использующих уголь и биомассу [31, 32].

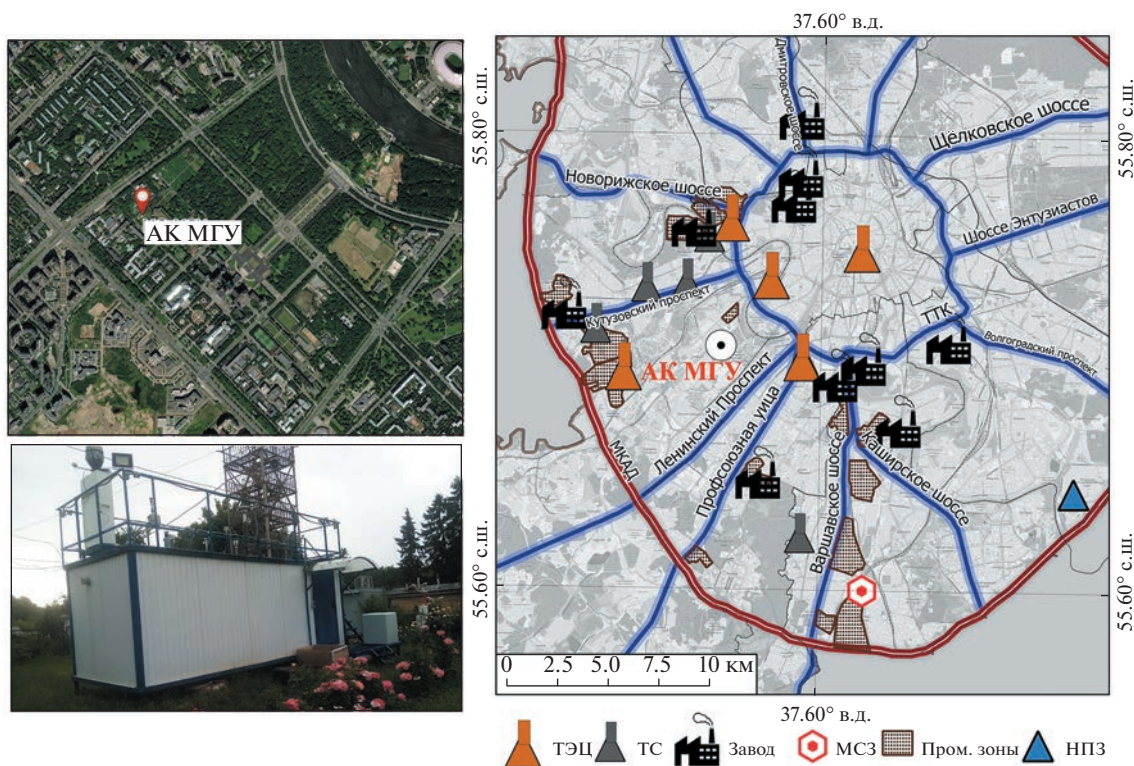
Измерения аэрозольной нагрузки атмосферы проводились на инструментальном Аэрозольном комплексе МГУ (АК МГУ), расположенном на территории Метеорологической обсерватории МГУ на юго-западе Москвы (рис. 1). Комплекс

находится в отдалении от локальных источников загрязнения, автомагистралей и промышленных предприятий, на расстоянии 800 м южнее жилого квартала и шоссе, более чем в 4 км от промышленных объектов. На юго-востоке от него расположены ТЭЦ-20 (7.3 км) и производство асфальтобетона “АБЗ ПК Вираз” (6.2 км), в юго-западном направлении — промышленная зона “Очаково” (5.6 км) и крупнейшая ТЭЦ-25 (4.8 км), а в северо-западном — промышленная зона “Фили” (5.7 км). Система отбора аэрозолей располагается на крыше павильона АК МГУ и снабжена импактором для сепарации крупных частиц. Частицы диаметром менее 10 мкм (PM<sub>10</sub>) отбирались с помощью низкообъёмного сборника аэрозолей LVS (Derenda, Germany), находящегося внутри павильона, в течение 24 ч. Отбор проводился на 47-миллиметровые кварцевые фильтры, предварительно прокалённые до 600°C в течение 6 ч. Объём прокачанного воздуха определялся при стандартных атмосферных условиях ( $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $P = 1 \text{ атм}$ ).

Измерительная кампания осуществлялась в весенний (17.04.2018–22.05.2018), осенний (23.09.2019–30.11.2019) и зимний (01.12.2019–18.01.2020) сезоны. Для оценки массовых концентраций PM<sub>10</sub> использовались данные анализатора пыли TEOM 1405, предоставленные станцией Мосэкомониторинга, которая находится на территории обсерватории МГУ. Измерения метеопараметров проводились на Метеорологической обсерватории МГУ каждые 3 ч. Отметим, что осень и зима в Москве в 2019–2020 гг. были аномально тёплыми. В весенний, осенний и зимний сезоны температуры были +16.5, +5.4 и +0.4°C соответственно, что оказалось на 6.2, 2.3 и 6.1°C выше средних показателей за предыдущие 30 лет наблюдений [24]. Розы ветров во все исследуемые периоды представлены в работах [23, 24].

Отопительный сезон в Москве начинается при температуре ниже 8°C и заканчивается при её установлении выше 8°C, формально разделяя год на холодный и тёплый периоды. В 2018 г. отопительный (холодный) сезон закончился 6 мая, так что весенний сезон отбора охватывал холодный и в тёплый периоды. Осенний и зимний отборы проводились в отопительный сезон, который начался 23 сентября 2019 г.

**Пространственное распределение источников.** Анализ изменений аэрозольных характеристик в зависимости от направления ветра, представленных в виде роз загрязнений, позволяет установить расположение источников высоких концентраций веществ по методике, описанной в [29]. Метод нахождения отношения траекторий переноса воздушных масс к концентрации аэрозолей в момент их прихода в точку наблюдений (Concentration Weight Trajectories, CWT) служит эффектив-



**Рис. 1.** Расположение Аэрозольного комплекса МГУ (АК МГУ) на юго-западе Москвы, транспортных магистралей, ближайших промышленных зон и заводов, объектов топливно-энергетического сектора (ТЭЦ, ТС), нефтеперерабатывающих (НПЗ) и мусоросжигательных (МСЗ) заводов в пределах МКАД

ным инструментом для анализа возможного происхождения загрязнений [33]. Концентрация  $C_{ij}$  для каждой ячейки сетки  $(i, j)$  рассчитывается как:

$$\ln(\bar{C}_{ij}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^N \ln(C_k) \tau_{ijk}, \quad (1)$$

где  $i$  и  $j$  – широта и долгота ячейки;  $k$  – индекс траектории;  $N$  – общее число рассчитанных траекторий;  $C_k$  – концентрация в момент прихода траектории  $k$  в место измерений;  $\tau_{ijk}$  – время пребывания траектории  $k$  в ячейке  $(i, j)$ . Полученные по результатам длительных исследований поля концентраций  $C_{ij}$  помогают установить связь между высоким содержанием веществ в точке наблюдений и траекториями движения воздушных масс, то есть указывают на области с повышенной интенсивностью эмиссии и вероятного расположения источника загрязнения.

С помощью модели HYSPLIT лаборатории “Air Resources Laboratory” [34] проведён расчёт массива обратных траекторий переноса воздушных масс с временным интервалом 1 ч и шагом 72 ч назад от момента расчёта на высоте 500 м над уровнем земли и пространственным разрешением  $1^\circ$  широты и  $1^\circ$  долготы. Данные о пожарной

активности получены из системы Resource Management System спутникового зондирования термоактивных точек на поверхности Земли, созданной NASA/GSFC Earth Science Data Information System (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>).

**Аналитические методы.** В пробах  $PM_{10}$  измерялось содержание 16 индивидуальных полиаренов, отнесённых к приоритетным органическим поллютантам (List Priority Pollutant, 2014). Экстракцию ПАУ с фильтров проводили хлороформом с использованием системы ASE200 (Dionex, США). Полученные экстракты отгоняли под вакуумом на ротационном испарителе и перерастворяли в 0.1 мл ацетонитрила. Количественное определение содержания ПАУ проводили методом обратнофазной хроматографии высокого давления на жидкостном хроматографе Agilent 1260 Infinity с флуориметрическим детектором и системой обработки данных ChemStation, HPChem. Параметры хроматографического процесса: колонка Zorbax Extend-C18 (5 мкм,  $4.6 \times 150$  мм); режим термостабильности  $+30^\circ\text{C}$ ; размер петли 10 мкл; скорость потока элюента 1 мл/мин; элюент ацетонитрил-вода, режим элюирования градиентный (от 50 до 100% ацетонитрила); режим детектирования мультиэмиссионный, длина волны возбуждения 280 нм, длины волн эмиссии 350, 405, 420, 500 нм.

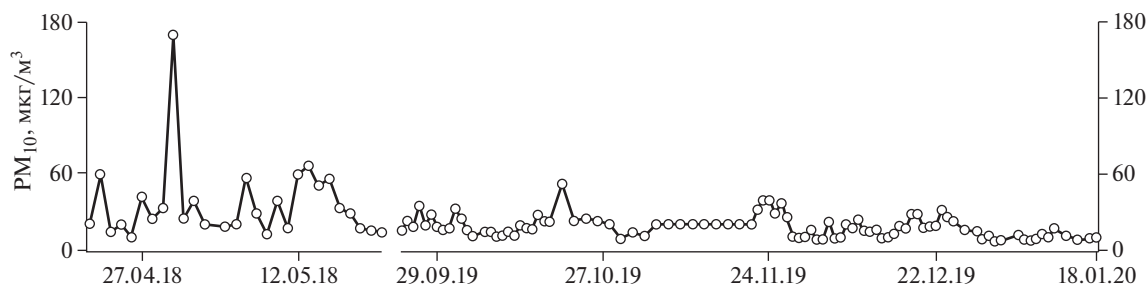


Рис. 2. Сезонная динамика среднесуточных значений массовых концентраций  $PM_{10}$  за весь период наблюдений

Калибровочные кривые по пяти точкам были получены с применением стандартов ПАУ (РАН Mixture, Ultra Scientific). Для каждого из 10 фильтров экстракцию и анализ проводили в трёхкратной повторности, среднеквадратичное отклонение использовали для расчёта относительной погрешности измерения для индивидуальных полиаренов. Относительная погрешность определения составила от 2 до 15%. Максимальный коэффициент вариации (15%) был у инденто(1,2,3-сд)пирена.

Оценка степени корреляции полученных данных проводилась по методу параметрической статистики критерия корреляции Пирсона, позволяющего определить наличие или отсутствие линейной связи между концентрациями индивидуальных ПАУ [35]. Для изомеров полиаренов рассчитывались диагностические отношения, широко используемые для идентификации источников происхождения веществ [10].

**Оценки токсикологических, мутагенных и канцерогенных рисков.** Для оценки рисков, связанных с присутствием в воздухе приоритетных полиаренов, использовался токсикологический эквивалент их смеси, рассчитанный на основе эквивалентных факторов, показывающих степень канцерогенной и мутагенной активности индивидуально-го соединения относительно бенз(а)пирена (БаП). Степень опасности воздействия ПАУ оценивалась по значениям токсического и мутагенного эквивалентов по отношению к бенз(а)пирену, а также по возрастанию риска развития рака лёгких [36]. По концентрациям 16 ПАУ проводился расчёт токсического эквивалента по бенз(а)пирену (TEQ):

$$TEQ_{16\text{ПАУ}} = \sum_i^{16} (C_i \times TEF_i). \quad (2)$$

Аналогичным образом находился мутагенный эквивалент по бенз(а)пирену:

$$MEQ_{16\text{ПАУ}} = \sum_i^{16} (C_i \times MEF_i), \quad (3)$$

где  $C_i$  — концентрация индивидуального ПАУ;  $TEF_i$  и  $MEF_i$  — токсические эквивалентные факторы, отражающие степень канцерогенной и мутагенной активности относительно бенз(а)пирена [37].

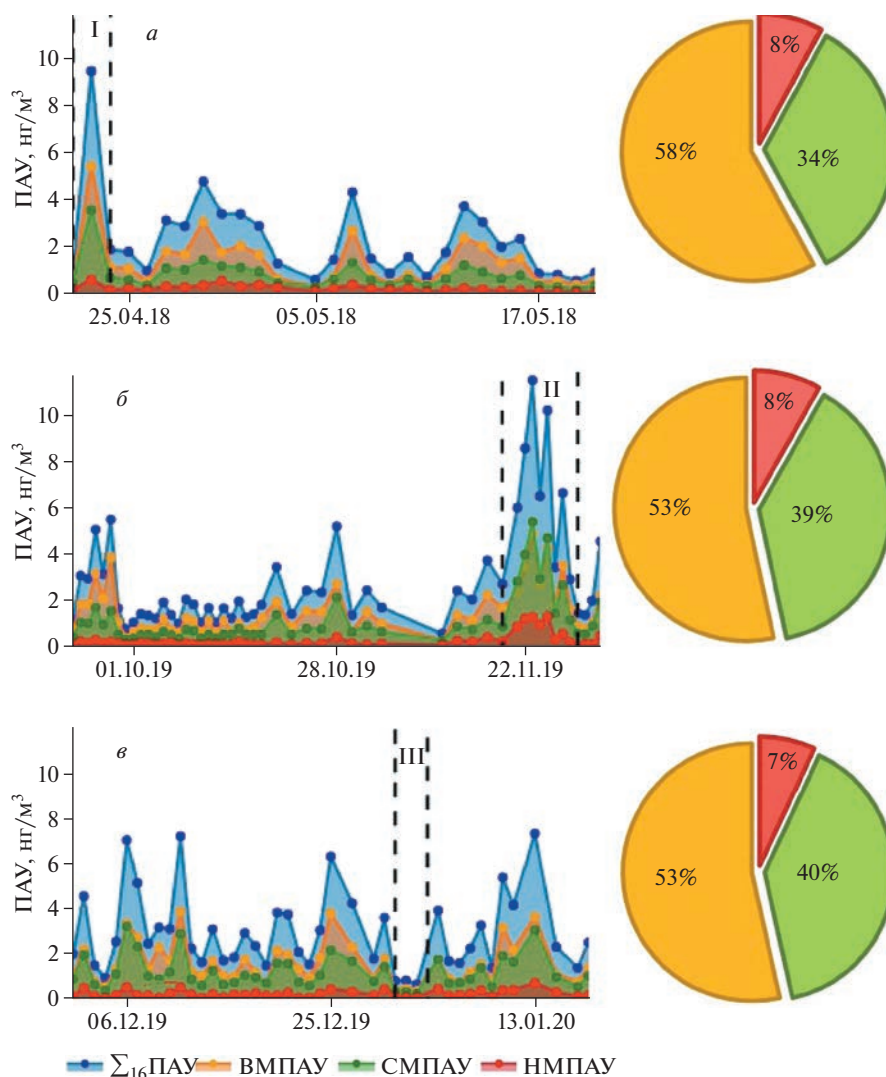
Увеличение риска возникновения случаев рака лёгких на 1 млн человек, возникающее из-за содержания в воздухе полиаренов, рассчитывалось по величине TEQ и значению единичного риска для ингаляционного воздействия в течение всей жизни  $IUR_{Adj-70}$ :

$$ILCR = TEQ_{16\text{ПАУ}} IUR_{Adj-70}, \quad (4)$$

где  $IUR_{Adj-70}$  — дополнительный риск заболевания раком в течение всей жизни при ингаляционном воздействии БаП с концентрацией  $1 \text{ нг/м}^3$  (равен  $8.7 \times 10^{-5}$ , согласно данным ВОЗ [38], и  $1.1 \times 10^{-6}$ , согласно US EPA [39]). ILCR, равное 1, интерпретируется как один дополнительный случай рака в популяции 1 млн человек, на протяжении всей жизни ежедневно подвергающихся экспозиции наблюдаемой суммарной концентрации ПАУ.

**Сезонная динамика концентраций полиаренов.** Сезонная динамика среднесуточных значений  $PM_{10}$  во все сезоны представлена на рисунке 2. Наибольшее превышение ПДК зарегистрировано 30 апреля 2018 г., когда содержание  $PM_{10}$  в воздухе возросло до  $168 \text{ мкг/м}^3$ . Во время новогодних праздников (с 1 по 10 января 2020 г.) показатели находились в пределах  $6.7\text{--}9.5 \text{ мкг/м}^3$ , что ниже среднего  $20.9 \pm 12 \text{ мкг/м}^3$  за весь период наблюдений. Массовая концентрация  $PM_{10}$  достигает средних значений весной 2018 г. ( $33 \pm 29 \text{ мкг/м}^3$ ), осенью 2019 г. ( $20 \pm 9 \text{ мкг/м}^3$ ) и зимой ( $9.4 \pm 2.8 \text{ мкг/м}^3$ ) 2019–2020 гг.

Временная динамика суммы концентраций 16 полиаренов ( $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$ ) за три периода отражена на рисунке 3. За всё время  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  изменялась в диапазоне  $0.4\text{--}11.6 \text{ нг/м}^3$ : высокие цифры зафиксированы в декабре ( $7.4 \text{ нг/м}^3$ ), апреле ( $9.5 \text{ нг/м}^3$ ) и ноябре ( $11.4 \text{ нг/м}^3$ ), минимальные — в апреле ( $0.4 \text{ нг/м}^3$ ) и новогодние праздники ( $0.6 \text{ нг/м}^3$ ). Средние значения  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  по сезонам представлены в таблице 1. Статистическая обработка дан-



**Рис. 3.** Сезонная динамика среднесуточных значений суммы концентраций 16 ПАУ, высоко-, средне- и низкомолекулярных ПАУ весной 2018 г. (а), осенью 2019 г. (б), зимой 2019–2020 гг. (в)  
Эпизоды повышенного загрязнения весной (I) и осенью (II), и низкого — зимой (III); круговые диаграммы отражают процентный вклад групп ПАУ в  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$

ных выявила тенденцию повышения медианного показателя от весеннего сезона ( $1.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) к осеннему ( $1.6 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) и далее к зимнему ( $2.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) (рис. 4). Такой же рост в холодные сезоны отмечен в европейских [8, 12] и азиатских городах [40], что объясняется увеличением выбросов отопительными системами и метеорологическими условиями, препятствующими рассеиванию загрязнителей по причине высокого атмосферного давления [11]. Для холодных сезонов также характерно менее интенсивное фотохимическое окисление ПАУ [41] и более высокая степень их накопления в аэрозольной фазе из-за снижения летучести [8]. Доля полиаренов в массовой концентрации  $\text{PM}_{10}$  весьма мала: процентный вклад  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  в  $\text{PM}_{10}$  за период наблюдений составляет  $0.015 \pm 0.01\%$ ,

весной он был наименьшим —  $0.007 \pm 0.004\%$ , в осенний —  $0.01 \pm 0.009\%$ , в зимний —  $0.023 \pm 0.02\%$ .

Заметных различий в относительном содержании групп НМПАУ, СМПАУ и ВМПАУ между весной, осенью и зимой не наблюдается (см. рис. 3). Процентное содержание групп в  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  за всё время исследования составило 55, 37 и 8% соответственно, что указывает на доминирующий вклад высокомолекулярных и минимальный вклад низкомолекулярных соединений. Были выделены эпизоды повышенных значений  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  относительно средних за сезон: повышение с 2.0 до  $3.1 \text{ ng}/\text{m}^3$  с 22 по 25 апреля 2018 г. (эпизод I), с 2.9 до  $8.4 \text{ ng}/\text{m}^3$  с 21 по 26 ноября 2019 г. (эпизод II). Заметим, что подобного повышения кон-

**Таблица 1.** Средние ( $\pm$  стандартное отклонение) сезонные концентрации  $\Sigma$ ПАУ\*, БаП и значения TEQ, MEQ ( $\text{нг/м}^3$ ); средние риски возникновения случаев рака лёгких на 1 млн человек  $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{WHO}}$  и  $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{EPA}}$ , рассчитанные по данным на АК МГУ в Москве, Иркутске [42] и Владивостоке [14]

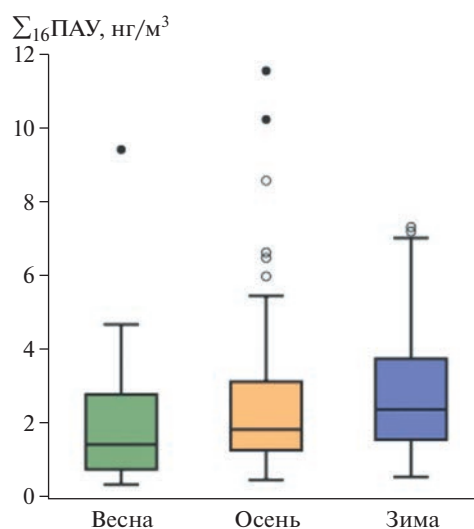
| Город, сезон   | $\Sigma$ ПАУ    | БаП               | TEQ     | MEQ  | $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{WHO}}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{EPA}}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) |
|----------------|-----------------|-------------------|---------|------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Москва, АК МГУ |                 |                   |         |      |                                                                    |                                                                    |
| Весна          | $2.0 \pm 1.8$   | $0.1 \pm 0.1$     | 0.3     | 0.4  | 22.2                                                               | 0.3                                                                |
| Эпизод I       | $3.1 \pm 3.6$   | $0.2 \pm 0.3$     | 0.4     | 0.6  | —                                                                  | —                                                                  |
| Осень          | $2.9 \pm 2.4$   | $0.2 \pm 0.2$     | 0.4     | 0.6  | 36.9                                                               | 0.5                                                                |
| Эпизод II      | $8.4 \pm 2.0$   | $0.7 \pm 0.2$     | 1.2     | 1.5  | —                                                                  | —                                                                  |
| Зима           | $2.9 \pm 1.8$   | $0.2 \pm 0.2$     | 0.5     | 0.6  | 38.8                                                               | 0.5                                                                |
| Эпизод III     | $0.7 \pm 0.1$   | $0.043 \pm 0.007$ | 0.08    | 0.13 | —                                                                  | —                                                                  |
| Иркутск        |                 |                   |         |      |                                                                    |                                                                    |
| Весна          | 1.9–24**        | 0.03–2.4          | 0.1–1.8 | —    | —                                                                  | —                                                                  |
| Осень          | 2.2–89          | 0.02–6.8          | 0.1–0.2 | —    | —                                                                  | —                                                                  |
| Зима           | 8.1–318         | 0.10–27           | 2.1–38  | —    | —                                                                  | —                                                                  |
| Лето           | 1.1–12          | 0.01–0.04         | 7.9–10  | —    | —                                                                  | —                                                                  |
| Владивосток    |                 |                   |         |      |                                                                    |                                                                    |
| Зима           | $18.6 \pm 9.80$ | $2.14 \pm 1.35$   | 2.84    | —    | —                                                                  | —                                                                  |
| Лето           | $0.54 \pm 0.21$ | $0.03 \pm 0.01$   | 0.05    | —    | —                                                                  | —                                                                  |

Примечание: \* $\Sigma$ ПАУ – это  $\Sigma_{16}$ ПАУ,  $\Sigma_{20}$ ПАУ и  $\Sigma_{10}$ ПАУ по данным в Москве, Иркутске и Владивостоке соответственно; \*\*разброс значений суммарной концентрации  $\Sigma_{20}$ ПАУ

центрации для  $\text{PM}_{10}$  не наблюдалось, что говорит о существенной разнице в источниках полиаренов и полной массовой концентрации аэрозолей. В новогодние праздники с 1 по 3 января 2019 г. зарегистрировано уменьшение  $\Sigma_{16}$ ПАУ с 2.3 до  $0.7 \text{ нг/м}^3$  в результате падения полной аэрозольной нагрузки (эпизод III).

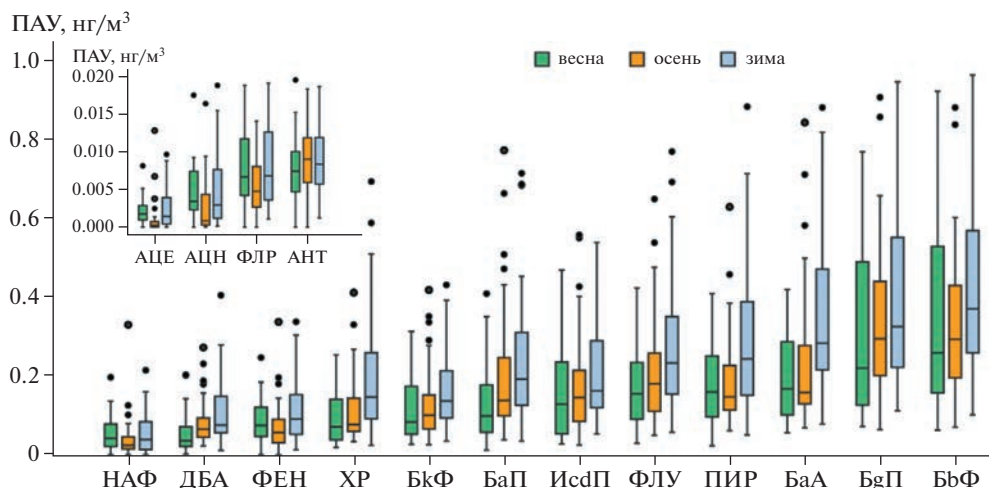
Статистические характеристики концентрации индивидуальных ПАУ за три рассматриваемых сезона представлены на рисунке 5: везде наблюдаются более высокие концентрации ВМПАУ по сравнению с СМПАУ и НМПАУ. Наибольшие цифры показывают БбФ, характерный для эмиссий автотранспорта [1], и БгП – маркер сжигания бензина и дизеля [43]. Отметим, что высокие концентрации БкФ, БаП, ИсдП, БаА и БбФ фиксируются в выбросах стационарных источников сжигания ископаемого топлива, в том числе газа [43]. У НМПАУ минимальные концентрации, среди них 3-кольчатые АЦЕ и АЦН показывают самые низкие значения.

Концентрация БаП изменялась от  $0.01 \text{ нг/м}^3$  (18–21 апреля) до  $0.95 \text{ нг/м}^3$  (эпизод II), не пре-



**Рис. 4.** Суммы концентраций 16 ПАУ, усреднённые за весенний, осенний и зимний сезоны

Линией внутри ящичной диаграммы с ограничителями выбросов указаны медианные значения, нижняя и верхняя границы соответствуют 25-му и 75-му процентилем, вертикальными линиями обозначены экстремумы, точками – выбросы



**Рис. 5.** Средние значения концентраций индивидуальных ПАО за весенний, осенний и зимний сезоны

Линией внутри ящичной диаграммы с ограничителями выбросов указаны медианные значения, нижняя и верхняя границы соответствует 25-му и 75-му процентилем, вертикальными линиями обозначены экстремумы, точками — выбросы

вышая ПДК во время всего периода наблюдений (см. табл. 1). Для сравнения, в атмосфере европейских и азиатских городов более высокие средние концентрации БаП: 1.05 нг/м³ в Дуйсбурге (Германия) осенью; 3.1 нг/м³ в Праге (Чехия) осенью и зимой; 11 нг/м³ в Фушуне (Китай) зимой [44].

Анализ относительного содержания полиаренов в  $\Sigma_{16}$ ПАО показывает идентичный вклад индивидуальных соединений в весеннем и зимнем сезонах. Осенью происходило нарастание 3- и 4-кольчатых ПАО за счёт повышения доли фенантрена, флуорантена и пирена, вклад 5- и 6-кольчатых снижался. Обращает на себя внимание увеличенный процентный вклад ФЕН и ФЛР в течение осеннего эпизода II, что может свидетельствовать о повышении доли эмиссий от промышленных предприятий [45].

Увеличение процентной доли ФЕН и ФЛР в концентрации  $\Sigma_{16}$ ПАО (рис. 6) в осенний эпизод II говорит о повышении роли эмиссий от промышленных источников [45], а доли ПИР — от источников, связанных с горением биомасс [9]. Отсутствие иных существенных различий во вкладах ПАО между сезонами свидетельствует об общих источниках их происхождения, что также подтверждается высоким коэффициентом корреляции между всеми индивидуальными ПАО ( $R > 0.75$ ). Отметим, что весной 2017 г. высокие коэффициенты корреляции Пирсона ( $R > 0.8$ ) были получены для ПИР, ФЛУ, БаА, БбФ, БкФ, АЦЕ, БаП, ИcdП, БгП, в то время как ДБА и АНТ не показали пропорциональной изменчивости [23], возможно, из-за сильного влияния на состав аэрозолей переноса дымовых эмиссий из пригорода

Москвы в период майских праздников и сельскохозяйственных палов.

Для сравнения, на фоновых территориях европейских городов зафиксированы следующие среднегодовые значения  $\Sigma_{16}$ ПАО: 2.2 нг/м³ в Мадриде (Испания) [46], 4.2 нг/м³ во Флоренции (Италия) [47]. В азиатских городах, для которых характерна большая доля сжигаемого в энергетике и жилом секторе угля, наблюдаются высокие концентрации: 8 нг/м³ в городском округе Хэфэй (Китай) [11], 62 нг/м³ в Улан-Баторе (Монголия) [6].

Многолетний анализ загрязнения атмосферы в Иркутске, промышленном центре Прибайкалья, показал  $\Sigma_{20}$ ПАО в диапазоне 1.9–24 нг/м³ весной, 1.1–12 нг/м³ летом и 2.2–89 нг/м³ осенью (см. табл. 1) [42]. Среднемесячные  $\Sigma_{20}$ ПАО в ноябре и декабре 2020 г. составили 22 и 52 нг/м³ соответственно. Для оценочного сравнения, по данным Аэрозольного комплекса МГУ в Москве, среднемесячные  $\Sigma_{16}$ ПАО в ноябре и декабре 2019 г. зарегистрированы на уровне 4.4 и 3.1 нг/м³, что в разы ниже Иркутских показателей. В прибрежном Владивостоке, где отопительная система функционирует преимущественно на угле, анализ сезонного загрязнения полиаренами показал, что средние концентрации  $\Sigma_{10}$ ПАО зимой 2019–2020 гг. (18.6 нг/м³) значительно отличаются от летних 2020 г. (0.54 нг/м³) [14]. Существенный вклад в загрязнение атмосферы зимой вносит атмосферный перенос из густонаселённых регионов Китая [14], в частности, средние концентрации  $\Sigma_{10}$ ПАО зимой 2019–2020 гг. в 7.5 раза превысили показа-

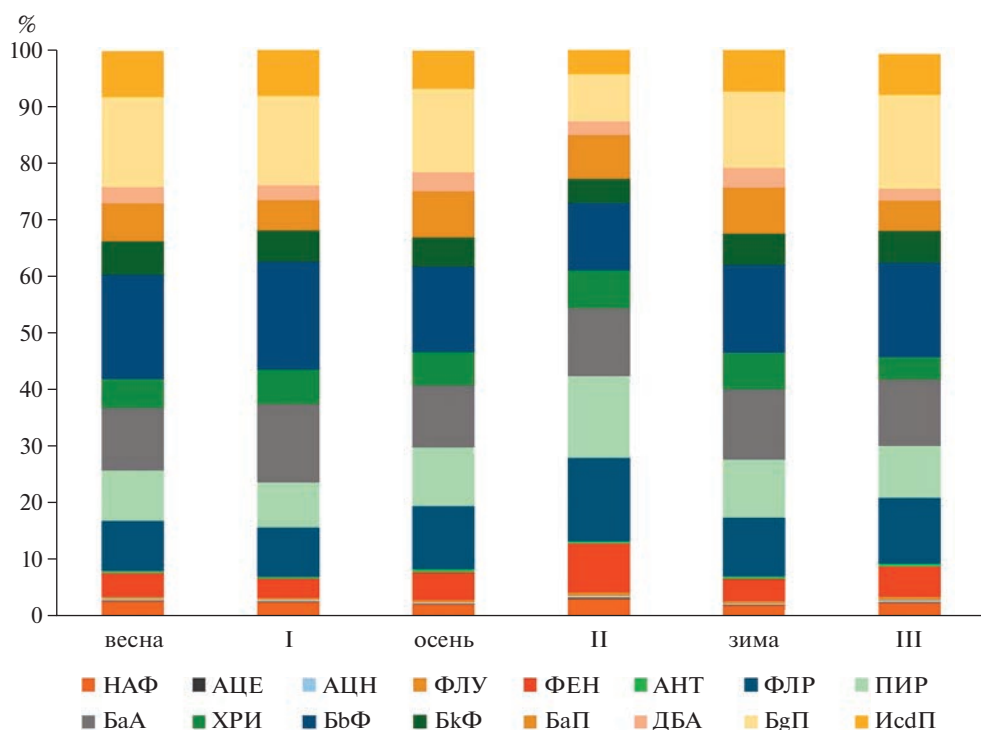


Рис. 6. Вклад индивидуальных ПАУ в  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  весной 2018 г., осенью 2019 г. и зимой 2019–2020 гг., а также в эпизоды загрязнений I, II, III

тели, полученные на АК МГУ в Москве в тот же период.

**Идентификация источников ПАУ.** В таблице 2 приведены значения диагностических отношений ПАУ, наиболее часто используемых для оценок источников аэрозольных загрязнений в городской среде [10]. На доминирование пирогенных источников сжигания природного ископаемого топлива, в том числе биомасс и угля, указывают  $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{ХР}) > 0.2$ ,  $\text{ИсдП}/(\text{ИсдП}+\text{БгП}) > 0.2$ ,  $\text{АНТ}/(\text{АНТ}+\text{ФЕН}) > 0.1$ ,  $\text{ФЛР}/(\text{ФЛР}+\text{ПИР}) > 0.4$ . Соотношение  $\text{БаП}/\text{БгП} > 0.6$  служит маркером транспортных выхлопов [48].

Идентификация источников ПАУ по данным с АК МГУ осуществляется на основе расчёта при-

ведённых диагностических отношений (табл. 3). В каждом из трёх сезонов  $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{ХР})$ ,  $\text{ФЛР}/(\text{ФЛР}+\text{ПИР})$ ,  $\text{ИсдП}/(\text{ИсдП}+\text{БгП})$  и  $\text{АНТ}/(\text{АНТ}+\text{ФЕН})$  находятся в диапазоне 0.66–0.69, 0.49–0.53, 0.31–0.34 и 0.08–0.15 соответственно, что указывает на доминирующий вклад автотранспорта, промышленных предприятий и отопительной системы московского мегаполиса. Более того,  $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{ХР}) > 0.2$  говорит об эмиссии сжигания биомасс и угля.

В весенний эпизод I изменение состава ПАУ по сравнению с характерным для этого сезона выражено слабо и заметнее всего в снижении  $\text{БаП}/\text{БгП}$  (см. рис. 6) в результате повышения доли эмиссий от сжигания биомассы. Значение

Таблица 2. Диагностические отношения ПАУ, характерные для эмиссий пирогенных и петрогенных источников в городской среде, по литературным источникам

| Диагностические отношения              | Пирогенные                        |                              | Петрогенные | Литература |
|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|------------|
|                                        | сжигание биомассы/древесного угля | сжигание ископаемого топлива |             |            |
| $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{ХР})$    | $>0.2$                            |                              | $<0.2$      | [49, 50]   |
| $\text{ФЛР}/(\text{ФЛР}+\text{ПИР})$   | $>0.5$                            | 0.4–0.5                      | $<0.4$      | [51]       |
| $\text{ИсдП}/(\text{ИсдП}+\text{БгП})$ | $>0.5$                            | 0.2–0.5                      | $<0.2$      | [50]       |
| $\text{АНТ}/(\text{АНТ}+\text{ФЕН})$   | $>0.1$                            |                              | $<0.1$      | [52]       |

**Таблица 3.** Диагностические отношения ПАУ весной 2018 г., осенью 2019 г., зимой 2019–2020 гг. и в эпизодах I, II и III, по данным АК МГУ

| Диагностические отношения | Весна           |                 | Осень           |                 | Зима            |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | сезон           | эпизод I        | сезон           | эпизод II       | сезон           | эпизод III      |
| БаА/(БаА+ХР)              | $0.69 \pm 0.05$ | $0.73 \pm 0.03$ | $0.66 \pm 0.03$ | $0.64 \pm 0.02$ | $0.67 \pm 0.04$ | $0.74 \pm 0.02$ |
| ФЛР/(ФЛР+ПИР)             | $0.49 \pm 0.05$ | $0.53 \pm 0.07$ | $0.51 \pm 0.04$ | $0.55 \pm 0.03$ | $0.53 \pm 0.04$ | $0.50 \pm 0.01$ |
| ИсдП/(ИсдП+БгП)           | $0.34 \pm 0.05$ | $0.34 \pm 0.03$ | $0.31 \pm 0.04$ | $0.33 \pm 0.03$ | $0.34 \pm 0.04$ | $0.30 \pm 0.06$ |
| АНТ/(АНТ+ФЕН)             | $0.10 \pm 0.04$ | $0.08 \pm 0.01$ | $0.15 \pm 0.09$ | $0.05 \pm 0.01$ | $0.13 \pm 0.06$ | $0.09 \pm 0.03$ |
| БаП/БгП                   | $0.43 \pm 0.16$ | $0.28 \pm 0.09$ | $0.52 \pm 0.1$  | $0.68 \pm 0.06$ | $0.57 \pm 0.13$ | $0.32 \pm 0.3$  |

ФЛР/(ФЛР+ПИР) выше 0.5 в эпизоды I и II даёт основание предполагать влияние сжигания биомассы на аэрозольное загрязнение атмосферы мегаполиса. Увеличенный процентный вклад ФЕН во время осеннего эпизода II (см. рис. 6) отражается на падении АНТ/(АНТ+ФЕН) до 0.05, что указывает на петрогенные эмиссии от нефтеперерабатывающих заводов, хранения и транспортировки нефтепродуктов. Уменьшение БаП/БгП в эпизод III (новогодние праздники) до 0.32 свидетельствует о большом снижении транспортной нагрузки.

**Розы загрязнения ПАУ.** Во все сезоны наблюдалась отрицательная корреляция  $\Sigma_{16}$ ПАУ со скоростью ветра, что объясняется интенсивным рассеиванием загрязняющих примесей при усилении ветра и их накоплением в безветренную погоду. Низкий коэффициент корреляции  $\Sigma_{16}$ ПАУ и скорости ветра указывает на высокую изменчивость атмосферных условий по причине переноса и смешения воздушных масс. В те же периоды исследования зарегистрирована обратная пропорциональная связь между концентрациями чёрного углерода<sup>1</sup> и скоростью ветра [23].

Согласно шкале Бофорта, принятой Всемирной метеорологической организацией для приблизительной оценки скорости ветра, “тихий” ветер – 0.3–1.5 м/с, “лёгкий” – 1.6–3.3 м/с, “слабый” – 3.4–5.4 м/с. С уменьшением скорости ветра возрастает процентный вклад ВМПАУ (см. рис. 6). При тихом ветре зафиксированы максимальные концентрации НАФ и ФЛУ и минимальные ДБА и БбФ. Наибольшая разница в концентрациях – у высокомолекулярных ПАУ, наименьшая – у низкомолекулярных.

Розы загрязнения отражают распределение концентраций полиаренов в зависимости от направления ветра. Высокие концентрации указывают на местоположение источников. На рисунке 7

представлены розы загрязнения низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ для весеннего, осеннего и зимнего сезонов. Весной 2018 г. отмечены высокие концентрации НМПАУ ( $0.6 \text{ нг/м}^3$ ), СМПАУ ( $4.0 \text{ нг/м}^3$ ) и ВМПАУ ( $5.0 \text{ нг/м}^3$ ) на северо-западе от Аэрозольного комплекса МГУ, в направлении промышленной зоны “Фили” и двух районных теплостанций ТЭУ-24 и ТЭЦ-26 (см. рис. 1). Также идентифицируются источники НМПАУ в юго-западном направлении, где в 4 км располагается промышленная зона “Очаково” и ТЭЦ-25. Осенью 2019 г. НМПАУ достигали  $1.2 \text{ нг/м}^3$ , ММПАУ и СМПАУ –  $5 \text{ нг/м}^3$ , направление максимальных концентраций всех групп полиаренов было юго-западное. Зимой 2019–2020 гг. произошло снижение концентраций ММПАУ и СМПАУ до  $4 \text{ нг/м}^3$ , тогда как НМПАУ превысили весенние уровни, но остались ниже максимальных значений осенью (до  $0.8 \text{ нг/м}^3$ ). Зимой зафиксирован источник ПАУ в западном, северо-западном (со стороны промзоны “Очаково”), а также южном направлениях, где располагаются наиболее близкие к АК МГУ теплостанция “Тёплый стан” и завод “МЗСС” по производству изделий технического назначения.

**Влияние удалённых источников эмиссий.** Кроме городских источников существенную долю в аэрозольное загрязнение вносят воздушные массы, переносимые из удалённых областей. Для установления региональных источников эмиссий ПАУ на основе результатов наблюдений на АК МГУ проведён расчёт полей концентраций  $\Sigma_{16}$ ПАУ по модели CWT с использованием формулы (1).

Рисунок 9 отражает пространственное распределение источников эмиссий  $\Sigma_{16}$ ПАУ в регионах вокруг Москвы в весенний и осенний сезоны. Весной 2018 г. воздушные массы приходили с севера Восточно-Европейской равнины. В это время в Вологодской, Ярославской, Ивановской, Владимирской и Московской областях зарегистрированы  $\Sigma_{16}$ ПАУ более  $0.7 \text{ нг/м}^3$ . Согласно спутниковым данным о расположении термоактивных точек, к этим регионам приурочены очаги

<sup>1</sup> Чёрный углерод – фракция аэрозолей, формирующаяся при горении природных топлив и биомасс, хорошо поглощающая солнечное излучение.

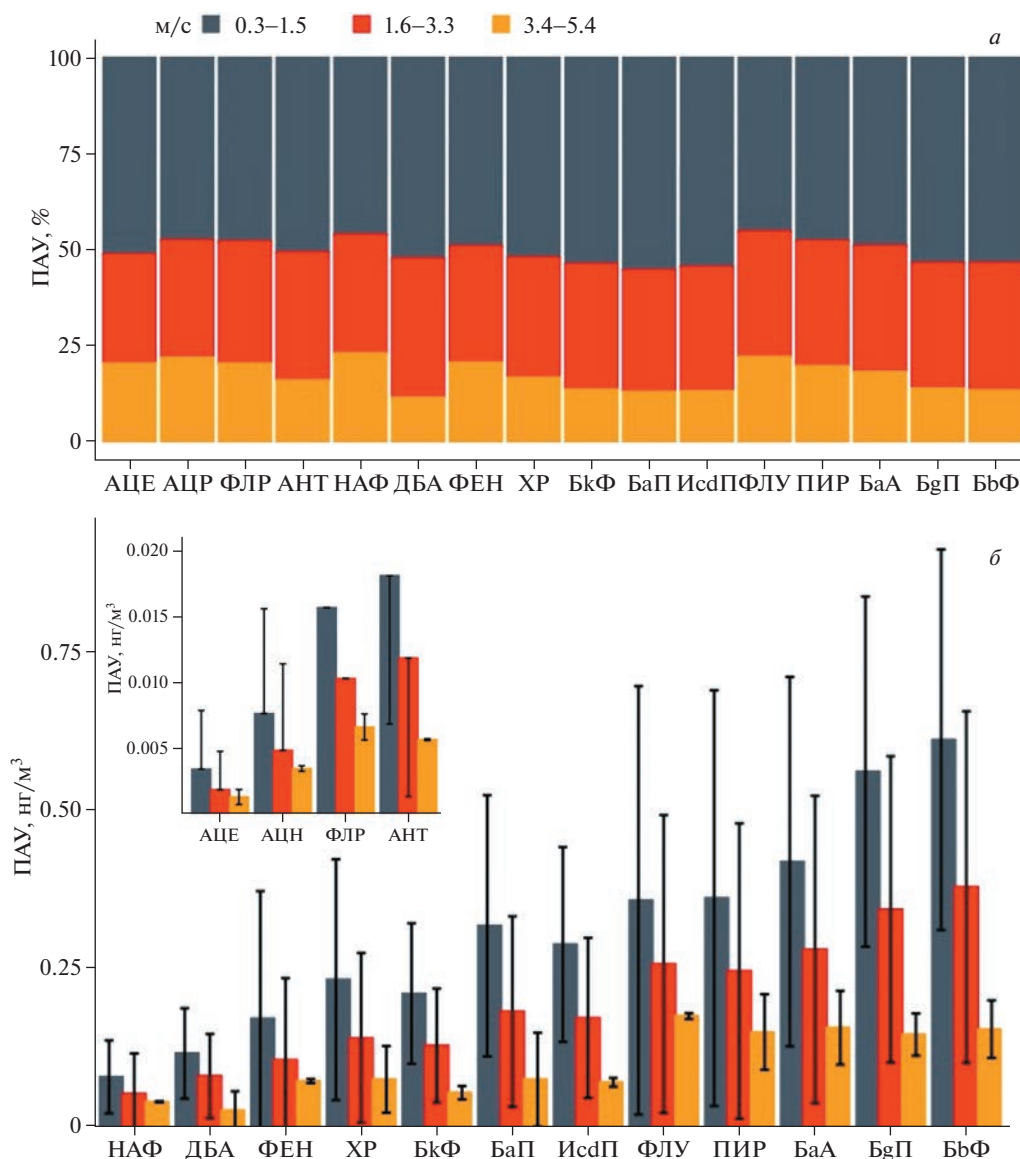


Рис. 7. Процентное содержание (а) и среднесуточные концентрации (б) индивидуальных ПАУ за весь период наблюдения, сгруппированные в зависимости от скорости ветра (лёгкий, тихий, слабый)

сельскохозяйственных пожаров. Возможно, они послужили причиной весеннего эпизода загрязнения I, что согласуется с ростом соотношения ФЛР/(ФЛР+ПИР) выше 0.5 в это же время. Траекторный анализ с 22 по 25 апреля 2018 г. (эпизод I) подтвердил перенос воздушных масс с севера и их прохождение над областями, охваченными пожарами (см. рис. 9, а).

Осенью 2019 г. воздушные массы изменили направление на преимущественно западное и южное, высокие концентрации  $\Sigma_{16}$ ПАУ более 0.7 нг/м³ зарегистрированы в Калужской, Тульской, Смоленской и Тверской областях. Обратные траектории воздушных масс с 23 по 27 ноября 2019 г. (эпизод II) также проходили над этими террито-

риями (см. рис. 9, б), подтверждая предположение о возможном вкладе в повышенные концентрации ПАУ в атмосфере мегаполиса эмиссий регионального сжигания биомасс, в соответствии с ФЛР/(ФЛР+ПИР) выше 0.5. Отметим, что падение АНТ/(АНТ+ФЕН) до 0.05 в этот эпизод говорит об увеличении петрогенных эмиссий, возможно, от нефтеперерабатывающих заводов, хранения и транспортировки нефтепродуктов на предприятиях.

**Токсикологические риски ПАУ.** Для оценки канцерогенной и мутагенной опасности смеси полиаренов рассчитаны средние сезонные значения токсического (ТЕQ) и мутагенного эквивалента по бенз(а)пирену (МЕQ), а также риски

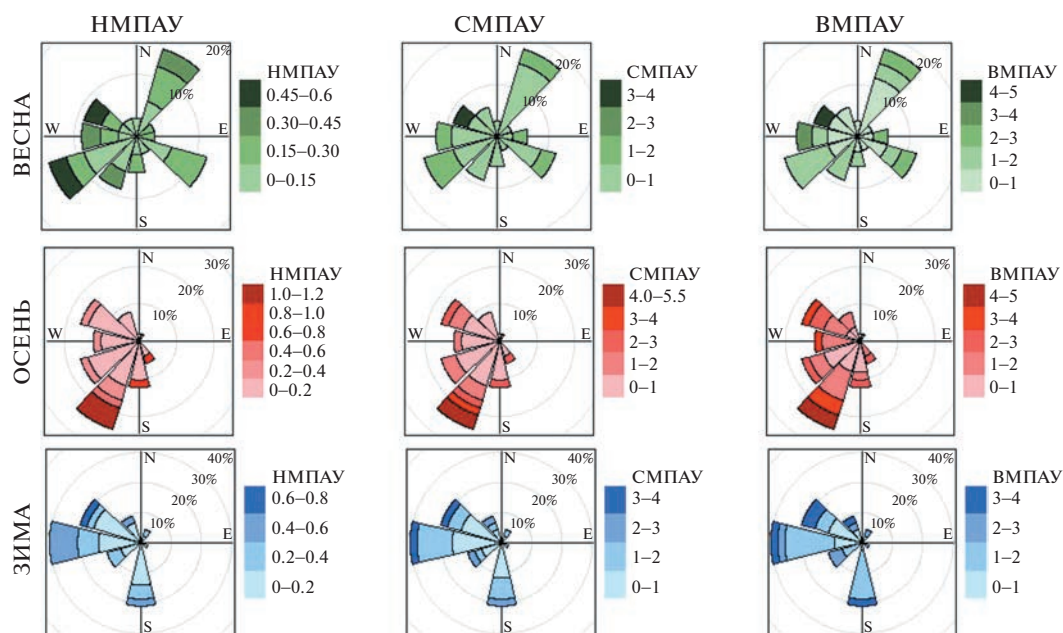


Рис. 8. Розы загрязнений для низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ весной 2018 г., осенью 2019 г. и зимой 2019–2020 гг.,  $\text{нг/м}^3$

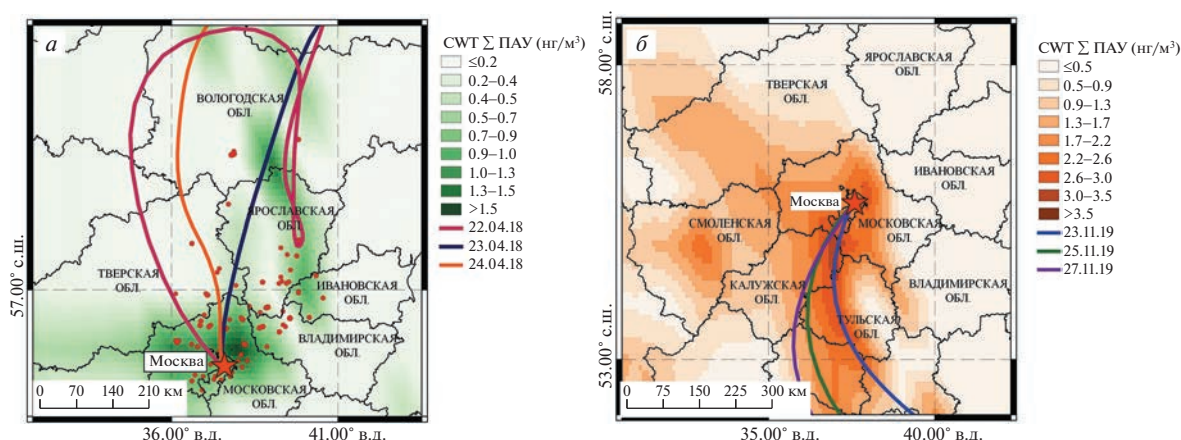


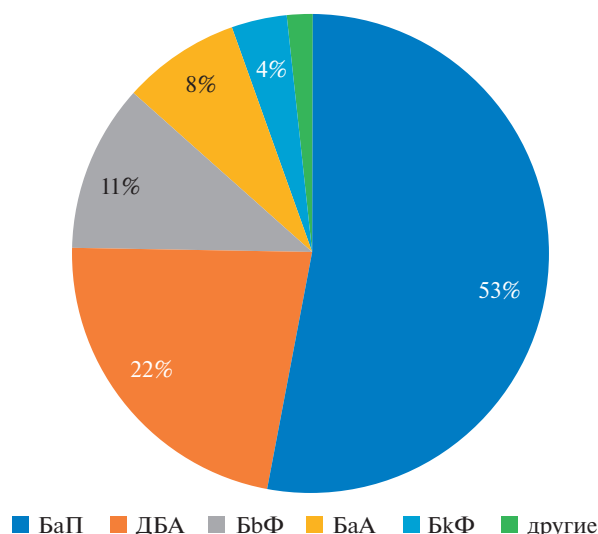
Рис. 9. Пространственное распределение источников  $\Sigma_{16}\text{ПАУ}$  в весенний (а) и осенний (б) сезоны. Точки — очаги пожаров в зоне  $\Sigma_{16}\text{ПАУ} > 0.7 \text{ нг/м}^3$ ; линии — обратные траектории воздушных масс в эпизоды загрязнения I и II

возникновения случаев рака лёгких на 1 млн человек  $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{WHO}}$  и  $\text{ILCR}_{\text{adj-70}}^{\text{EPA}}$  (см. табл. 1). Зимний и осенний сезоны характеризуются более высоким средним TEQ (0.45, 0.42) в сравнении с весенним (0.26). Подобный результат наблюдается и для среднего MEQ: 0.58, 0.55 и 0.38 соответственно. Увеличение TEQ и MEQ до 0.4 и 0.6 зафиксировано во время весеннего эпизода I и до 1.2 и 1.5 во время осеннего эпизода II. В эпизод III TEQ снизился до 0.08, а MEQ — до 0.13.

Ингаляционный риск возникновения рака (ILCR), рассчитанный по данным трёх сезонов

с использованием  $\text{IUR}_{\text{Adj-70}}$ , установленного WHO, составляет 32 на 1 млн человек, а в случае с  $\text{IUR}_{\text{Adj-70}} = 0.5$  на 1 млн человек, что не превышает установленного US EPA допустимого показателя  $10^{-6}$ .

Основной вклад в канцерогенную опасность смеси 16 ПАУ во все сезоны вносят БаП (около 50%) и ДБА (20%) (рис. 10), что обусловлено их большими токсическими эквивалентными факторами TEF по сравнению с другими соединениями. Также значительны содержания БкфФ (12%) и БаА (9%), а суммарный вклад остальных поли-



**Рис. 10.** Средние за весь период наблюдения значения процентных вкладов индивидуальных ПАУ в токсический эквивалент TEQ

аренов – 2%. Аналогичное распределение долей индивидуальных ПАУ в TEQ получено в азиатских и европейских городах [8, 12] и объясняется схожей структурой источников эмиссий крупных городов с доминирующим вкладом транспорта, промышленности и системы отопления. В больших городах мира TEQ сильно варьирует: а европейских Мадриде и Флоренции среднегодовые значения – 0.34 [46] и 0.3 [47]; в Азии – 0.66 в округе Хэфэй [11] и 10 в Улан-Баторе [6]. В Иркутске TEQ варьирует в диапазоне 0.1–38 [42], во Владивостоке – 0.05–2.84 [11] (см. табл. 1).

\* \* \*

Исследования аэрозольного загрязнения полиароматическими углеводородами московского мегаполиса показали, что суммарная концентрация 16 приоритетных ПАУ возрастала от весеннего сезона к осеннему и далее – к зимнему. Концентрации БаП в течение всего периода измерений не превышали ПДК. Максимальные концентрации зарегистрированы для высокомолекулярных ПАУ, в том числе для БгП и БбФ (маркеры транспортных эмиссий), наименьшие – для низкомолекулярных. Больших различий в относительном содержании групп полиаренов между весной, осенью и зимой не наблюдалось. Отрицательная корреляция  $\Sigma_{16}$ ПАУ со скоростью ветра объясняется накоплением поллютантов в безветренную погоду. Для всего холодного периода измерений было характерно доминирование пирогенных источников эмиссий – сжигания ископаемого топлива и биомасс в промышленных, транспортных, отопительных системах. В осенний и весенний сезоны зафиксировано влияние

переноса дымовых шлейфов из регионов, охваченных пожарами и сельскохозяйственными палами. Во время новогодних праздников концентрации ПАУ в атмосфере Москвы снижались. Значения токсикологического и мутагенного эквивалентов ПАУ возрастали пропорционально увеличению концентрации полиаренов от весеннего сезона к осеннему и зимнему. Они соответствуют уровню крупных европейских городов. Риск возникновения дополнительных случаев рака лёгких не превышает допустимого. Уровни концентраций и канцерогенной опасности смеси ПАУ низкие по сравнению с большими и промышленно развитыми российскими и азиатскими городами, что объясняется преимущественным использованием газа в отопительных и промышленных системах московского мегаполиса.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Обработка данных измерений ПАУ проведена при поддержке проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-574. Оценка токсикологических рисков выполнена в рамках проекта РНФ № 19-77-30004-П.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за предоставление гранта на обновление оборудования для научных исследований в рамках федерального проекта “Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации” национального проекта “Наука и университеты”. Исследования включены в Программу развития междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ali-Taleshi M.S., Bakhtiari A.R., Moeinaddini M. et al. Single-site source apportionment modeling of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs in the Tehran metropolitan area, Iran: Implications for source-specific multi-pathway cancer risk assessment // *Urban Climate*. 2021. V. 39. 100928.
2. Yang L., Zhang H., Zhang X. et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: A review // *International journal of environmental research and public health*. 2021. № 4. 2177.
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans et al. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures // *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. 2010. V. 92. P. 1–853.
4. List, Priority Pollutant. United States environmental protection agency, 2014.
5. USEPA. Provisional Guidance for Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 1993.

6. *Byambaa B., Yang L., Matsuki A. et al.* Sources and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient total suspended particles in Ulaanbaatar City, Mongolia // *International journal of environmental research and public health*. 2019. № 3. 442.
7. *Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.* A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation // *Egyptian journal of petroleum*. 2016. № 1. P. 107–123.
8. *Tsiotra I., Grivas G., Tavernaraki K. et al.* Annual exposure to PAHs in urban environments linked to winter-time wood-burning episodes // *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*. 2021. P. 1–24.
9. *Nelson J., Chalbot M.C.G., Tsiotra I. et al.* Physico-chemical characterization of personal exposures to smoke aerosol and PAHs of wildland firefighters in prescribed fires // *Exposure and Health*. 2021 V. 13. P. 105–118.
10. *Tobiszewski M., Namieśnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental pollution*. 2012. V. 162. P. 110–119.
11. *Wang R., Huang Q., Cai J., Wang J.* Seasonal variations of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) surrounding Chaohu Lake, China: Source, partitioning behavior, and lung cancer risk // *Atmospheric Pollution Research*. 2021. № 5. 101056.
12. *Alves C.A., Vicente A.M., Custódio D. et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives (nitro-PAHs, oxygenated PAHs, and azaarenes) in PM<sub>2.5</sub> from Southern European cities // *Science of the total environment*. 2017. V. 595. P. 494–504.
13. *Маринайте И.И., Горшков А.Г., Тараненко Е.Н. и др.* Распределение полициклических ароматических углеводородов в природных объектах на территории рассеивания выбросов Иркутского алюминиевого завода (г. Шелехов, Иркутская обл.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. № 2. С. 143–154.
14. *Wang Y., Zhang H., Zhang X. et al.* PM-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitro-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Ambient Air of Vladivostok: Seasonal Variation, Sources, Health Risk Assessment and Long-Term Variability // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. № 5. 2878.
15. *Lammel G., Dvorská A., Klánová J. et al.* Long-range atmospheric transport of polycyclic aromatic hydrocarbons is worldwide problem-results from measurements at remote sites and modelling // *Acta Chimica Slovenica*. 2015. № 3. P. 729–735.
16. *Hrdina A.I., Kohale I.N., Kaushal S. et al.* The Parallel Transformations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Body and in the Atmosphere // *Environmental Health Perspectives*. 2022. № 2. 025004.
17. *Saarnio K., Sillanpää M., Hillamo R. et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in size-segregated particulate matter from six urban sites in Europe // *Atmospheric Environment*. 2008. № 40. P. 9087–9097.
18. *Eiguren-Fernandez A., Miguel A.H., Froines D. et al.* Seasonal and spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in vapor-phase and PM<sub>2.5</sub> in Southern California urban and rural communities // *Aerosol Science and Technology*. 2004. № 5. P. 447–455.
19. *Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M.* Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atmospheric Environment*. 2018. V. 175. P. 54–64.
20. Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2018 году” // Под ред. А.О. Кульбачевского. М., 2019.
21. Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году” // Под ред. А.О. Кульбачевского. М., 2020.
22. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”, 2021.
23. *Popovicheva O., Padoan S., Schnelle-Kreis J. et al.* Spring aerosol in urban atmosphere of megacity: Analytical and statistical assessment for source impact // *Aerosol and Air Quality Research*. 2020. № 4. P. 702–717.
24. *Popovicheva O.B., Volpert E., Sitnikov N.M. et al.* Black carbon in spring aerosols of Moscow urban background // *Geography, environment, sustainability*. 2020. № 1. P. 233–243.
25. *Zappi A., Popovicheva O., Tositti L. et al.* Factors influencing aerosol and precipitation ion chemistry in urban background of Moscow megacity // *Atmospheric Environment*. 2023. V. 294. 119458.
26. *Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Касимов Н.С.* Влияние ограничительных мер во время пандемии COVID-19 на аэрозольное загрязнение атмосферы московского мегаполиса // *Вестник Российской академии наук*. 2021. № 4. P. 351–361; *Popovicheva O.B., Chichaeva M.A., Kasimov N.S.* Impact of Restrictive Measures during the COVID-19 Pandemic on Aerosol Pollution of the Atmosphere of the Moscow Megalopolis // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021. № 2. P. 213–222.
27. *Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Timofeev I.V. et al.* Benzo[a]pyrene in Moscow road dust: pollution levels and health risks // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. V. 45. P. 1–26.
28. *Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б. и др.* Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 9. С. 49–64.
29. *Bityukova V.R., Mozgunov N.A.* Spatial features transformation of emission from motor vehicles in Moscow // *Geography, environment, sustainability*. 2019. № 4. P. 57–73.
30. *Битюкова В.Р., Саульская Т.Д.* Изменение антропогенного воздействия производственных зон Москвы за последние десятилетия // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2017. № 3. С. 24–33.
31. *Cheng Z., Luo L., Wang S. et al.* Status and characteristics of ambient PM<sub>2.5</sub> pollution in global megacities // *Environment international*. 2016. V. 89. P. 212–221.
32. *Diapouli E., Kalogridis A.C., Markantonaki C. et al.* Annual variability of black carbon concentrations originat-

- ing from biomass and fossil fuel combustion for the sub-urban aerosol in Athens, Greece // *Atmosphere*. 2017. № 12. 234.
33. Shukurov K., Postilyakov O., Borovski A. et al. Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the AM Obukhov Institute of Atmospheric Physics // In Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. № 1. 012048.
  34. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. V. 96. P. 2059–2077
  35. Lim H., Sadiqsis I., de Oliveira Galvão M. et al. Polycyclic aromatic compounds in particulate matter and indoor dust at preschools in Stockholm, Sweden: Occurrence, sources and genotoxic potential in vitro // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 755. 142709.
  36. Gusev A., Batrakova N. Assessment of PAH pollution levels, key sources and trends: contribution to analysis of the effectiveness of the POPs Protocol. Progress report. MSC-E Technical Report 2/2020. June 2020.
  37. Nisbet I.C.T., Lagoy P.K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Regulatory toxicology and pharmacology*. 1992. № 3. P. 290–300.
  38. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2010.
  39. OEHHA, 2003. Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments in urban aerosol of Augsburg, Germany // *Environmental Pollution*. V. 159. P. 1861–1868.
  40. Bandowe B.A.M., Meusel H., Huang R.J. et al. PM<sub>2.5</sub>-bound oxygenated PAHs, nitro-PAHs and parent-PAHs from the atmosphere of a Chinese megacity: Seasonal variation, sources and cancer risk assessment // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 473. P. 77–87.
  41. Lin Y., Ma Y., Lammel Qiu X. et al. Sources, transformation, and health implications of PAHs and their nitrated, hydroxylated, and oxygenated derivatives in PM<sub>2.5</sub> in Beijing // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. № 14. P. 7219–7228.
  42. Marinaite I., Penner I., Molozhnikova E. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of the Southern Baikal Region (Russia): Sources and Relationship with Meteorological Conditions // *Atmosphere*. 2022. № 3. 420.
  43. Pietrogrande M.C., Abbaszade G., Schnelle-Kreis J. et al. Seasonal variation and source estimation of organic compounds in urban aerosol of Augsburg, Germany // *Environmental Pollution*. 2011. № 7. P. 1861–1868.
  44. Rogula-Kozłowska W., Kozielska B., Klejnowski K. Hazardous compounds in urban PM in the central part of Upper Silesia (Poland) in winter // *Archives of Environmental Protection*. 2013. № 1. P. 53–65.
  45. Jariyasopit N., Tung P., Su K. et al. Polycyclic aromatic compounds in urban air and associated inhalation cancer risks: A case study targeting distinct source sectors // *Environmental pollution*. 2019. V. 252. P. 1882–1891.
  46. Mirante F., Alves C., Pio C. et al. Organic composition of size segregated atmospheric particulate matter, during summer and winter sampling campaigns at representative sites in Madrid, Spain // *Atmospheric Research*. 2013. V. 132. P. 345–361.
  47. Martellini T., Giannoni M., Lepri L. et al. One year intensive PM<sub>2.5</sub> bound polycyclic aromatic hydrocarbons monitoring in the area of Tuscany, Italy. Concentrations, source understanding and implications // *Environmental Pollution*. 2012. V. 164. P. 252–258.
  48. Katsoyiannis A., Sweetman A.J., Jones K.C. PAH molecular diagnostic ratios applied to atmospheric sources: a critical evaluation using two decades of source inventory and air concentration data from the UK // *Environmental science & technology*. 2011. № 20. P. 8897–8906.
  49. Akyüz M., Çabuk H. Gas-particle partitioning and seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Zonguldak, Turkey // *Science of the total environment*. 2010. № 22. P. 5550–5558.
  50. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R. et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // *Organic geochemistry*. 2002. № 4. P. 489–515.
  51. Ravindra K., Sokhi R., van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation // *Atmospheric environment*. 2008. № 13. P. 2895–2921.
  52. Pies C., Hoffmann B., Petrowsky J. et al. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils // *Chemosphere*. 2008. № 10. P. 1594–1601.

ИЗ РАБОЧЕЙ ТЕТРАДИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

**КАРБОКСИАЛКИЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ХИТОЗАНА  
КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ РОСТА  
И РАЗВИТИЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ**

© 2023 г. Л. А. Хамидуллина<sup>a,b,\*</sup>, П. Д. Тобышева<sup>a,b,\*\*</sup>, О. Е. Черепанова<sup>c,\*\*\*</sup>,  
И. С. Пузырев<sup>a,\*\*\*\*</sup>, А. В. Пестов<sup>a,b,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>b</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

<sup>c</sup>Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*E-mail: khamidullina@ios.uran.ru

\*\*E-mail: tobysheva@list.ru

\*\*\*E-mail: botgarden.olga@gmail.com

\*\*\*\*E-mail: puzyrev@ios.uran.ru

\*\*\*\*\*E-mail: pestov@ios.uran.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 18.06.2023 г.

Основой развития современного высокопродуктивного экологически чистого растениеводства выступают научно обоснованные биотехнологии. Полимер природного происхождения хитозан ввиду высокой доступности, биобезопасности и синтетической гибкости представляет собой отличную базу для построения новых агробиотехнологических средств, отвечающих требованиям фармацевтических и пищевых производств. В работе приведены результаты исследований росторегулирующего действия N-(2-карбоксиэтил)хитозана (КЭХ) в отношении семян и молодых растений эхинацеи пурпурной. Показано, что алкилпроизводные хитозана — безопасные препараты, которые можно с успехом применять для культивирования пищевых и лекарственных растений, в том числе редких и исчезающих видов.

**Ключевые слова:** хитозан, карбоксиалкилхитозан, аминокислоты, биологическая активность, биополимеры, лекарственные растения, регуляторы роста, сельское хозяйство, сложноцветные.

**DOI:** 10.31857/S0869587323070046, **EDN:** ZLMNTO

В задачи здравоохранения входят поддержание здорового образа жизни населения и профи-

ХАМИДУЛЛИНА Лилия Альбертовна — кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории перспективных органических материалов ИОС УрО РАН, научный сотрудник НИИ ФПМ ИЕиМ УрФУ. ТОБЫШЕВА Полина Дмитриевна — лаборант лаборатории органических материалов ИОС УрО РАН. ЧЕРЕПАНОВА Ольга Евгеньевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией биотехнологии и популяционной генетики Ботанического сада УрО РАН. ПУЗЫРЕВ Игорь Сергеевич — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории органических материалов ИОС УрО РАН. ПЕСТОВ Александр Викторович — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории органических материалов ИОС УрО РАН, доцент кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений ИЕиМ УрФУ.

лактика острых и хронических заболеваний. К сожалению, профилактике не уделяется достаточно внимания. Здесь может помочь развитие фармакогнозии как одного из важнейших направлений социально-экономического развития нашей страны, особенно в реалиях затяжной пандемии.

Получение фармакологически полезного материала дикорастущих растений сопряжено с рядом трудностей: несанкционированный сбор, потери от фитопатогенов и насекомых-вредителей, зависимость от климатических условий, непостоянный выход биологически активных веществ (БАВ) и т.д. Как правило, при возделывании культур большинства лекарственных растений в открытом грунте содержание целевых компонентов в них чрезвычайно мало, а их выделение требует переработки огромного количества исходного сырья. Поэтому интерес к эффективным и эко-

логически чистым технологиям культивирования растений и биологически обоснованным методам выделения активных веществ из них постоянно растёт.

Технологии селекции и размножения растений, основанные на последних достижениях науки, выступают основой развития современного растениеводства. Процесс возделывания практически всех современных агрокультур включает обязательное использование химических препаратов. Важнейший этап при этом – разумное включение регуляторов роста растений в циклы возделывания различных культур. При потенциальном применении в производстве фармпрепаратов и БАВ лидерами остаются агрохимические средства с высокой эффективностью и низкой токсичностью. Наиболее перспективными с этой точки зрения представляются химически модифицированные соединения природного происхождения.

При получении новых средств защиты растений, регуляторов роста, удобрений, биостимулирующих и антипатогенных добавок на основе биобезопасных органических соединений преимущественно обладают биогенные молекулы, прежде всего полисахариды, которые на рынке химического сырья присутствуют в виде отходов многотоннажных химических и биотехнологических производств. *Хитозан* как полимер природного происхождения – в настоящее время коммерчески доступный полисахарид, повышенная реакционная способность которого по сравнению, например, с целлюлозой или крахмалом, создаёт безграничные возможности синтеза новых экофильных соединений для сельского хозяйства. Это свойство хитозана позволяет в том числе вводить в его структуру фрагменты метаболически активных аминокислот. Такая стратегия отвечает современному прогрессивному тренду, направленному на обеспечение экологической безопасности растительных сообществ и возобновляемости сельскохозяйственных ресурсов.

В растениеводстве полисахариды могут применяться на всех этапах производства растительной продукции, начиная с прайминга<sup>1</sup> семян и заканчивая послеуборочными мероприятиями. Использование нативного (неизменённого) хитозана ограничивается его физико-химическими свойствами, прежде всего малой растворимостью, и узким спектром биоактивности. Функционализация хитозана позволяет существенно расширить перечень его производных, а также разнообразие биологических свойств.

<sup>1</sup> Прайминг – обработка семян, которая включает их контролируемое набухание до уровня влагосодержания, не допускающего видимого проклёвывания зародышевого коreshка сквозь семенную оболочку.

Будучи нетоксичными и неаллергенными биоадгезивными полимерами, полиаминосахариды и их производные широко изучаются с точки зрения их антипатогенных свойств, регенеративного потенциала и иммуногенной активности [1]. Хитозан и его производные также интересны в плане их использования в производстве пищевых агрокультур [2, 3]. Помимо регуляции роста и развития хитозаны (как индивидуально, так и в комбинации с другими препаратами) приводят к формированию устойчивости растений к патогенам и условиям абиотического стресса [4–6]. Характер этих реакций зависит как от растений-хозяев, стадии роста и развития, так и от физико-химических свойств применяемых хитозанов, их состава и строения [7]. Однако оценке их воздействия на культуры лекарственных растений уделяется недостаточно внимания. Исследовательские работы, направленные на изучение ростостимулирующих свойств функционализированных хитозанов, немногочисленны и содержат лишь единичные упоминания [8–10]. Обычно применяется нативный хитозан, а исследования влияния производных хитозана с новыми функциональными группами на рост и развитие лекарственных растений в литературе отсутствуют вовсе, хотя подавление фитопатогенов производными хитозана изучается довольно активно [5–7].

В отношении растений хитозан используется как росторегулятор [11, 12] и элиситор<sup>2</sup> [11, 13–15], который способен повышать продукцию вторичных метаболитов [10], фитогормонов [16] и влиять на углеродный и азотный обмен растений. В частности, низкомолекулярный хитозан вызывает изменения фотосинтетической активности, течения цикла трикарбоновых кислот и ассимиляции азота [17]. В условиях биотического и абиотического стресса данный биополимер активизирует систему защиты растений, что инициирует противopatогенный ответ [11, 13, 18] и обеспечивает иммунитет растительного организма, например, в условиях засухи [19]. Также интересны антитранспираторные свойства хитозана, обеспечивающие снижение потери воды растениями благодаря повышению концентрации абсцизовой кислоты и закрытию устьиц [20]. Кроме того, в агробиотехнологии он применяется в качестве суперабсорбента для удерживания воды в почве наряду с такими синтетическими полимерами,

<sup>2</sup> Элиситоры – несвойственные для растения молекулы, часто связанные с вредителями, патогенами или синергетическими организмами. Могут взаимодействовать со специальными белками-рецепторами, расположенными на мембране растительных клеток. Рецепторы распознают молекулярную структуру элиситоров и запускают внутриклеточную защитную реакцию – иммунный ответ, что приводит к усиленному синтезу метаболитов, которые, в свою очередь, уменьшают повреждения и повышают устойчивость к вредителям, патогенам или абиотическому стрессу.

как полиакриламид, полиакриловая кислота и поливиниловый спирт [8].

Хитозан и его производные способны как повышать содержание активных форм кислорода в клетках, так и, в большей степени, понижать, предупреждая окислительный стресс [21]. За счёт этого активируется L-фенилаланин-аммоний-лиаза, участвующая в шикиматном пути<sup>3</sup> биосинтеза обладающих антиоксидантной активностью фенольных соединений растений и цианобактерий [22], и происходит синтез гидроксикоричных кислот, кумаринов, стильбенов, лигнина, пигментов, фитоалексинов, а главное — флавоноидов, которые играют важную роль в растительном метаболизме [23].

Росторегулирующая активность хитозана выражается в активации ростовых процессов многих пищевых культур, в частности, в повышении урожайности. Среди других эффектов — увеличение ростовых показателей и биомассы побегов, корней и цветков. Кроме того, он служит источником энергии в процессе биосинтеза углеводов и азота для продукции первичных метаболитов. Данные эффекты проявляются *in vivo* и *in vitro* и становятся возможными в том числе благодаря способности хитозана регулировать осмотический потенциал клеток и, как следствие, увеличивать доступность для растений воды и питательных веществ и их усвоение. Присутствие хитозана на поверхности растительных клеток активирует ферменты гидролиза, необходимые для мобилизации питательных резервов крахмала и белков. Он индуцирует деление клеток корней путём активации фитогормонов ауксинов и цитокининов [11]. Имеются данные о способности указанного биополимера блокировать развитие корневых систем растений, изменяя морфологию и характер деления клеток и приводя к ингибированию элонгации (удлинения) и трансформации архитектуры корня. Такой эффект объясняется накоплением под воздействием хитозана индолуксусной кислоты (ИУК) в корнях за счёт индукции триптофанзависимого пути биосинтеза ауксинов и репрессии генов, задействованных в транспорте ИУК. Аккумуляция ауксинов в корнях останавливает их элонгацию и развитие придаточных корней, которые в этих условиях формируются слабыми и недоразвитыми [16].

Повышение скорости прорастания семян, роста и развития молодых растений под действием хитозана сопровождается активацией ферментных антиоксидантов, предупреждающих возможное нарушение развития активными формами кислорода. Формирование на поверхности семян полупроницаемой плёнки из хитозана способствует удержанию воды и её дополнительной аб-

сорбции из почвы [11]. Прайминг семян его раствором увеличивает скорость их прорастания, длину и биомассу побегов и корневых систем, а также снижает содержание в клетках малонового диальдегида (свидетельствующего о накоплении продуктов перекисного окисления липидов), изменяет проницаемость мембран, повышает накопление водорастворимых сахаров и пролина<sup>4</sup> и запускает пероксидазную и каталазную активность [18].

Известно о положительном влиянии хитозана на содержание хлорофилла и каротиноидов у растений семейств паслёновых (Solanaceae), злаков (Poaceae), бобовых (Fabaceae) [10, 24–26] и астровых (Asteraceae) [27]. Обработка листовой поверхности раствором высокомолекулярного хитозана приводит к увеличению фотосинтетической активности кукурузы и сои, в отличие от низкомолекулярного [18]. Данный эффект коррелирует с повышением устьичной проводимости, транспирации и ускорением метаболизма углерода и азота, но не связан с изменением внутриклеточной концентрации углекислого газа [17, 18]. Низкомолекулярный хитозан увеличивает активность фотосистемы II<sup>5</sup> на мембранах тилакоидов. При этом регуляция фотосинтеза проявляется и в активации фермента рубиско<sup>6</sup>, приводящего к образованию 3-фосфоглицерата в цикле Кальвина. Данный эффект является ростостимулирующим, так как приводит к формированию сахарозы, мальтозы, фосфоенолпирувата и далее пирувата, вступающего в цикл трикарбоновых кислот, интермедиаты которого задействованы в синтезе аминокислот [17].

Несмотря на широкий спектр биологической активности, у хитозана есть ряд недостатков: низкая растворимость в воде, затрудняющая его использование без предварительной подготовки; как следствие, более низкие биодоступность и эффективность; отсутствие в структуре фрагментов, отвечающих за дополнительные биологические свойства, что вынуждает добавлять в препарат вспомогательные компоненты. В связи с этим

<sup>4</sup> Проллин — гетероциклическая аминокислота, содержание которой многократно увеличивается при стрессовых воздействиях, что помогает растениям адаптироваться к неблагоприятным условиям.

<sup>5</sup> Фотосистемы I и II представляют собой два мультисубъединичных мембранно-белковых комплекса, участвующих в кислородном фотосинтезе. Главное отличие между ними заключается в том, что фотосистема I поглощает свет с большей длиной волны (>680 нм), в то время как фотосистема II поглощает короткие волны (<680 нм). Фотосистема I расположена на наружной поверхности тилакоидной мембраны, фотосистема II — на внутренней.

<sup>6</sup> Комплекс белков рубиско (рибулозобисфосфаткарбоксилаза) — ключевой фермент, запускающий все процессы фотосинтеза путём связывания атмосферного углекислого газа.

<sup>3</sup> Шикиматный путь — метаболический путь, промежуточным метаболитом которого является шикимовая кислота.

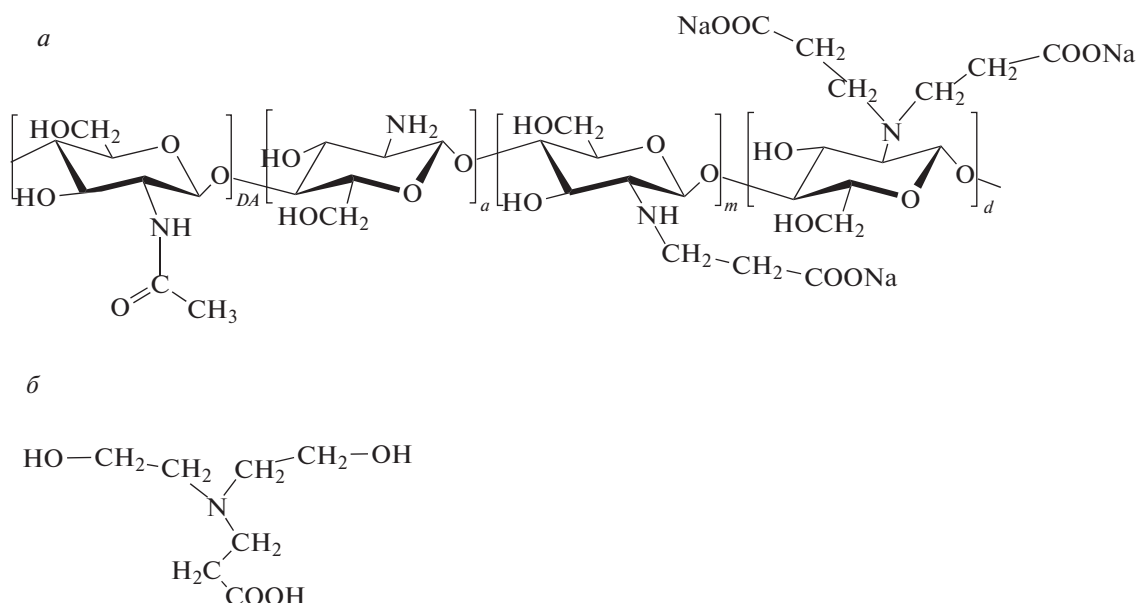


Рис. 1. Структура N-(2-карбоксиэтил)хитозана (а) и N,N-бис(2-гидроксиэтил)-β-аланина (б)

перспективным направлением работ становится функционализация хитозана.

Практически не исследовано влияние введения новых заместителей в нативную структуру хитозана на эффекты активации роста и развития растений. Обогащение структуры хитозана карбоксилсодержащими фрагментами позволяет получать производные с повышенными абсорбционными и биоактивными свойствами, выражающимися в большей влагоудерживающей способности и более эффективном вовлечении биополимера в метаболизм растений. С учётом изменения физико-химических свойств [28, 29] становятся очевидными более выраженные биодоступность, биоадгезивность и сольватирующая способность производных хитозана. Данные преимущества выходят на первый план в период прорастания семени, когда вода, поступившая в эндосперм, гидролизует высокомолекулярные соединения, переводя нерастворимые питательные вещества в доступную форму, что направлено на стимуляцию жизненных процессов.

Авторами данной статьи, а также другими исследователями были установлены положительные эффекты от обработки семян и молодых растений растворами карбоксиалкильных производных хитозана:

- активация всхожести семян, роста и развития проростков;
- увеличение биомассы, содержания фотосинтетических пигментов, общего количества растворимых сахаров, крахмала, аминокислот, растворимого белка;

- усиление активности антиоксидантных ферментов;

- повышение содержания фенольных соединений и активности ферментов, участвующих в их образовании;

- снижение концентрации малонового диальдегида и пролина;

- уменьшение общего содержания азота, но некоторое увеличение общего содержания фосфора и калия;

- изменение параметров фотосинтеза посредством включения производных хитозана в механизмы устьичной активности, транспирации и работы фотосистемы II [9, 10, 30, 31].

Применение полусинтетических молекул, полученных из хитозана, может способствовать росту, повышать стрессоустойчивость и иммунитет растений, изменять поглощение питательных веществ проростками, усиливать газообмен в листьях, индуцировать толерантность к дефициту воды и улучшать фотосинтетические параметры у чувствительных к засухе культур.

Наши эксперименты по проращиванию семян и культивированию молодых растений эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*) показали, что использование N-(2-карбоксиэтил)хитозана (КЭХ) (рис. 1, а) в виде раствора для предварительного замачивания семян и опрыскивания растений приводит к повышению всхожести в условиях *in vivo* по сравнению с нативным хитозаном [32]. Это может быть обусловлено изменениями физико-химических свойств вследствие объединения в одну молекулу хитозана (взятого за основу) и

**Таблица 1.** Параметры прорастания семян эхинацеи *in vitro*: энергия прорастания (ЭП) и доля семян с семядолями (ДСС) на 5, 8 и 12 сутки эксперимента (экспресс-эксперимент на бумаге в чашках Петри), %

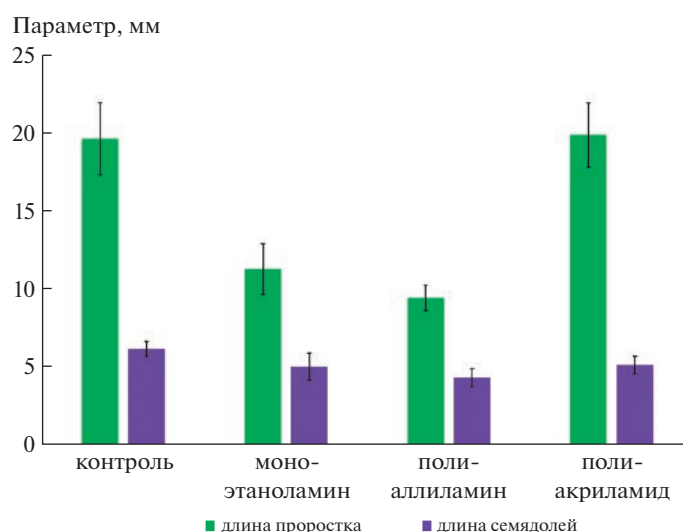
| Соединение     | 5 сутки |     | 8 сутки |     | 12 сутки |     |
|----------------|---------|-----|---------|-----|----------|-----|
|                | ЭП      | ДСС | ЭП      | ДСС | ЭП       | ДСС |
| Контроль       | 22      | 8   | 44      | 22  | 46       | 26  |
| Моноэтаноламин | 6       | 0   | 14      | 6   | 22       | 8   |
| Полиаллиламин  | 0       | 0   | 4       | 0   | 12       | 2   |
| Полиакриламид  | 20      | 6   | 36      | 22  | 44       | 40  |

аминокислоты  $\beta$ -аланина. Наличие фрагмента этой аминокислоты в структуре хитозана позволяет повысить гидрофильные свойства и, как следствие, растворимость и биодоступность производного, в результате чего усиливаются сольватирующий эффект гидрогеля (увеличивается степень набухания биополимера и повышается биодоступность питательных веществ почвы) и биоадгезионная способность по отношению к растительным клеткам.

Таким образом, на основе полученных результатов можно предположить, что КЭХ, обладая гидрофильными свойствами, обеспечивает семена достаточным количеством воды и выводит их из состояния покоя. Это способствует гидролизу высокомолекулярных соединений и трансформации нерастворимых питательных веществ в доступную форму. Вероятно, подобных эффектов следует ожидать от любого влагоудерживающего агента, способного формировать гидрогели и применяемого в агробиологии. Однако использование полиакриламида (известного агробиотехнологического гелеобразователя) в наших экспериментах *in vivo* привело к ускоренному прораста-

нию лишь на первых этапах (в течение недели от начала эксперимента). В дальнейшем семена этой линии отставали от необработанных (контрольная линия). Мы полагаем, что замедление прорастания объясняется ярко выраженными по сравнению с другими полимерами плёнообразующими свойствами полиакриламида: плёнообразование способствует изоляции семени и переходу его в состояние покоя, ограничению поступления воды и кислорода внутрь и, следовательно, ингибированию прорастания. КЭХ, напротив, продемонстрировал благоприятные, неингибирующие прорастание плёнообразующие свойства в условиях *in vivo* на всём протяжении эксперимента.

Закономерным становится вопрос об отличии основных свойств этих двух биополимеров. Действительно, при использовании ряда аминокислотных производных (моноэтаноламин, полиаллиламин, полиакриламид) мы убедились в негативном влиянии основности аминокислотной группы на прорастание семян и дальнейшее развитие растений (табл. 1, рис. 2). В этом ключе КЭХ вновь лидировал по сравнению с прямым конкурентом — метаболитичес-

**Рис. 2.** Линейные параметры проростков эхинацеи на 12 сутки эксперимента *in vitro* (экспресс-эксперимент на бумаге в чашках Петри)

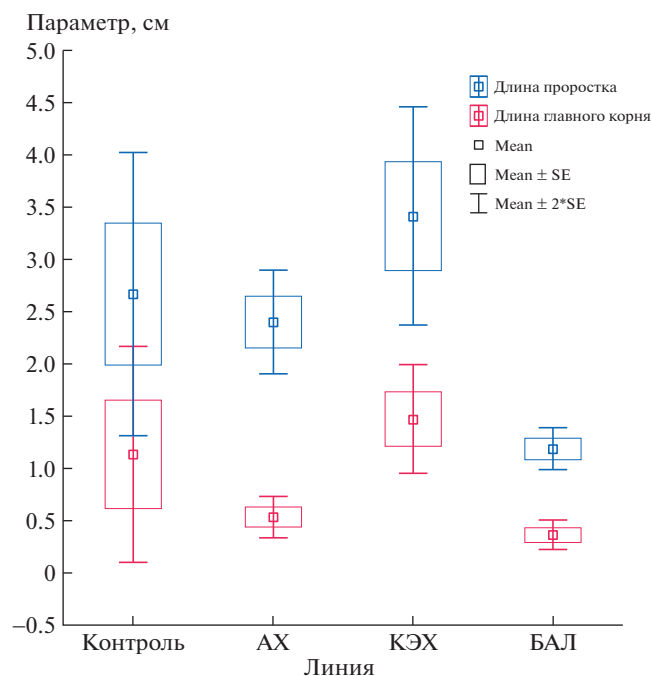
**Таблица 2.** Энергия прорастания семян эхинацеи на 6, 12 и 20 сутки эксперимента *in vivo* (соотношение почва–вермикулит – 2 : 1), %

| Соединение      | 6 сутки | 12 сутки | 20 сутки |
|-----------------|---------|----------|----------|
| Контроль        | 15      | 41       | 46       |
| Ацетат хитозана | 23      | 46       | 52       |
| КЭХ             | 23      | 44       | 49       |
| Полиакриламид   | 25      | 48       | 52       |
| $\beta$ -Аланин | 39      | 69       | 72       |
| ДБАЛ            | 28      | 52       | 57       |

ски активной и энзимогенной аминокислотой  $\beta$ -аланином. Хотя  $\beta$ -аланин и активировал процессы прорастания семян *in vivo*, он тормозил ростовые процессы в ходе дальнейшего развития проростков. Активация прорастания может быть объяснена малой молекулярной массой  $\beta$ -аланина, позволяющей аминокислоте эффективнее взаимодействовать с тканями развивающегося семени и быть вовлечённой в его метаболизм. Данная закономерность справедлива для ряда соединений: КЭХ, N,N-бис(2-гидроксиэтил)- $\beta$ -аланин (ДБАЛ),  $\beta$ -аланин (рис. 1, б). По мере уменьшения молекулярной массы соединений

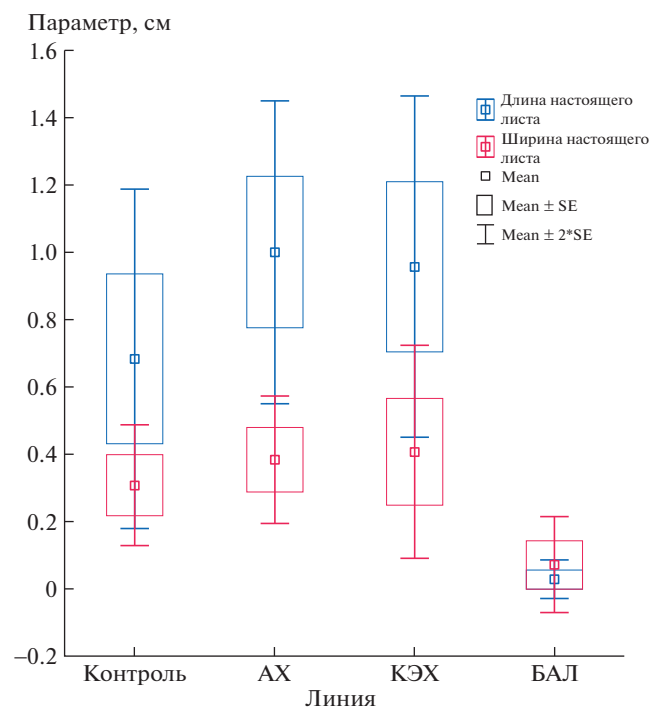
возрастал их активационный эффект на прорастание семян эхинацеи *in vivo* (табл. 2). При этом, если  $\beta$ -аланин и его дигидроксиэтилпроизводное ДБАЛ в этих условиях не оказывали какого-либо положительного эффекта на развитие проростков, то КЭХ демонстрировал явные преимущества. Вероятно, активный старт прорастания под действием  $\beta$ -аланина истощает питательный потенциал семени, аминокислота быстро расходуется клетками, больше не оказывая положительного эффекта на процессы роста и развития.

При рассмотрении морфофизиологических характеристик растений или, метафорически выражаясь, их урожайности, КЭХ показал перспективные результаты (рис. 3, 4). В экспериментах *in vitro*  $\beta$ -аланин угнетал молодые растения: его применение замедляло рост и развитие проростков и влекло за собой формирование слаборазвитой корневой системы и настоящих листьев малых размеров. Сравнение с хитозаном также оказалось не в пользу  $\beta$ -аланина: в первую неделю эксперимента *in vitro*  $\beta$ -аланин, действительно, благоприятно влиял на процессы формирования и активного роста молодого корешка, но в дальнейшем приводил к некоторому изменению морфологического облика растения – укороченной малоразветвлённой корневой системе.



**Рис. 3.** Длина проростков эхинацеи и главного корня на 20 сутки эксперимента *in vitro* (питательная среда Мурасиге–Скуга)

Mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего



**Рис. 4.** Размеры настоящих листьев у проростков эхинацеи на 20 сутки эксперимента *in vitro* (питательная среда Мурасиге–Скуга)

Mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего

В исследованиях показано, что использование хитозана в качестве росторегулятора вызывает увеличение листовой поверхности [11, 33, 34] в результате накопления фитогормонов ауксинов, которые напрямую влияют на элонгацию клеток вегетативной части путём растяжения клеточной стенки [35]. Это может негативно сказаться на анатомо-функциональном облике растения по причине истончения клеточных стенок, ослабления их механической прочности, а также нарушения архитектуры корня, где накопление ауксинов, напротив, тормозит рост и деление клеток [36]. В условиях *in vivo* КЭХ стимулировал формирование более развитой надземной части по сравнению с контролем на всём протяжении эксперимента. По морфологическому облику проростки данной линии не отличались от контрольных и лидировали по объёму надземной части в середине эксперимента, а по развитию фотосинтетических органов — в конце. Таким образом, КЭХ существенно не повлиял на естественный ход ростовых процессов, при этом способствовал сохранению гармоничного развития растений эхинаеи пурпурной. Стоит также отметить, что в эксперименте *in vivo* проростки опытной линии превосходили растения, выращенные с использованием хитозана, по развитию корневой системы, надземной части побега и фотосинтетических органов в середине эксперимента.

Проведённые нами исследования наглядно показали, что химическая модификация хитозана — перспективный путь преодоления его недостатков. С учётом наших наблюдений и свидетельств в литературных источниках можно утверждать, что алкилпроизводные хитозана могут успешно использоваться в качестве росторегуляторов с функциями почвенных кондиционеров. Такие безопасные [37] агробιοтехнологические средства необходимы при поиске методов эффективного культивирования пищевых и лекарственных растений, жизненно важны при разработке платформ для размножения редких растений *in vitro*, для сохранения исчезающих видов в коллекциях *ex situ*, позволяют максимизировать фармацевтическое и пищевое производство с единицы площади посадочной поверхности, а значит — снизить нагрузку на экосистему.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-26-20068 (<https://rscf.ru/project/22-26-20068/>).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Qu J., Zhao X., Liang Y. et al. Degradable conductive injectable hydrogels as novel antibacterial, anti-oxidant

- wound dressings for wound healing // Chem. Eng. J. 2019. V. 362. P. 548–560.
2. Maluin F.N., Hussein M.Z. Chitosan-based agronanochemicals as a sustainable alternative in crop protection // Molecules. 2020. № 7. P. 1611–1633.
3. Das S.N., Madhuprakash J., Sarma P.V.S.R.N. et al. Biotechnological approaches for field applications of chitooligosaccharides (COS) to induce innate immunity in plants // Crit. Rev. Biotechnol. 2015. № 1. P. 29–43.
4. Kolesnikov L.E., Novikova I.I., Popova E.V. et al. The effectiveness of biopreparations in soft wheat cultivation and the quality assessment of the grain by the digital x-ray imaging // Agron. Res. 2020. № 4. P. 2436–2448.
5. Malerba M., Cerana R. Chitosan Effects on Plant Systems // Int. J. Mol. Sci. 2016. № 7. 996.
6. du Jardin P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation // Sci. Hortic. (Amsterdam). 2015. V. 196. P. 3–14.
7. Faoro F., Gozzo F. Is modulating virus virulence by induced systemic resistance realistic? // Plant Sci. 2015. V. 234. P. 1–13.
8. Chang L., Xu L., Liu Y. et al. Superabsorbent polymers used for agricultural water retention // Polym. Test. 2021. V. 94. 107021.
9. Zhang M., Zhang F., Li C. et al. Application of Chitosan and Its Derivative Polymers in Clinical Medicine and Agriculture // Polymers. 2022. V. 14 (5). 958.
10. Rabêlo V.M., Magalhães P.C., Bressanin L.A. et al. The foliar application of a mixture of semisynthetic chitosan derivatives induces tolerance to water deficit in maize, improving the antioxidant system and increasing photosynthesis and grain yield // Sci. Rep. 2019. № 1. 8164.
11. Chakraborty M., Hasanuzzaman M., Rahman M. et al. Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer // Agric. 2020. № 12. P. 1–30.
12. Malerba M., Cerana R. Recent advances of chitosan applications in plants // Polymers. 2018. № 2. 118.
13. Xing K., Zhu X., Peng X. et al. Chitosan antimicrobial and eliciting properties for pest control in agriculture: a review // Agron. Sustain. Dev. 2015. № 2. P. 569–588.
14. Li K., Xing R., Liu S. et al. Chitin and Chitosan Fragments Responsible for Plant Elicitor and Growth Stimulator // J. Agric. Food Chem. 2020. № 44. P. 12203–12211.
15. Orzali L., Corsi B., Forni C. et al. Chitosan in Agriculture: A New Challenge for Managing Plant Disease // Biol. Act. Appl. Mar. Polysaccharides. 2017. P. 17–36.
16. Lopez-Moya F., Suarez-Fernandez M., Lopez-Llorca L.V. Molecular mechanisms of chitosan interactions with fungi and plants // Int. J. Mol. Sci. 2019. № 2. 332.
17. Zhang X., Li K., Xing R. et al. Metabolite profiling of wheat seedlings induced by chitosan: Revelation of the enhanced carbon and nitrogen metabolism // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 2017.
18. El Hadrami A., Adam L.R., El Hadrami I. et al. Chitosan in plant protection // Mar. Drugs. 2010. № 4. P. 968–987.

19. *Hidangmayum A., Dwivedi P., Katiyar D. et al.* Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress // *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2019. № 2. P. 313–326.
20. *Iriti M., Picchi V., Rossoni M. et al.* Chitosan anti-transpirant activity is due to abscisic acid-dependent stomatal closure // *Environ. Exp. Bot.* 2009. № 3. P. 493–500.
21. *Ivanova D.G., Yaneva Z.L.* Antioxidant Properties and Redox-Modulating Activity of Chitosan and Its Derivatives: Biomaterials with Application in Cancer Therapy // *Biores. Open Access*. 2020. № 1. P. 64–72.
22. *Babaoglu Aydaş S., Ozturk S., Aslim B.* Phenylalanine ammonia lyase (PAL) enzyme activity and antioxidant properties of some cyanobacteria isolates // *Food Chem.* 2013. № 1. P. 164–169.
23. *Sayed M., Khodary S.E.A., Ahmed E.S. et al.* Elicitation of flavonoids by chitosan and salicylic acid in callus of *Rumex vesicarius* L. // *Acta Hort.* 2017. V. 1187. P. 165–176.
24. *El-Tantawy E.M.* Behavior of tomato plants as affected by spraying with chitosan and aminofort as natural stimulator substances under application of soil organic amendments // *Pakistan J. Biol. Sci.* 2009. № 17. P. 1164–1173.
25. *Khan W.M., Prithiviraj B., Smith D.L.* Effect of foliar application of chitin and chitosan oligosaccharides on photosynthesis of maize and soybean // *Photosynthetica*. 2002. № 4. P. 621–624.
26. *Phothi R., Theerakarunwong C.D.* Effect of chitosan on physiology, photosynthesis and biomass of rice (*Oryza sativa* L.) under elevated ozone // *Aust. J. Crop Sci.* 2017. № 5. P. 624–630.
27. *El-Sayed I.M., Salim R.G., El-Haggar E.F. et al.* Molecular characterization and positive impact of brassinosteroids and chitosan on *Solidago canadensis* cv. Tara characteristics // *Horticulturae*. 2020. № 4. P. 1–18.
28. *Bratskaya S.Y., Pestov A.V., Yatluk Y.G. et al.* Heavy metals removal by flocculation/precipitation using N-(2-carboxyethyl)chitosans // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Asp.* 2009. № 1–3. P. 140–144.
29. *Sokovnin S.Y., Balezin M.E., Puzyrev I.S. et al.* Sorbents based on N-(2-carboxyethyl)chitosan cross-linked by nanosecond electron beams // *Russ. Chem. Bull.* 2009. № 6. P. 1172–1179.
30. *Khamidullina L.A., Cherepanova O.E., Tobysheva P.D. et al.* Activation effect of  $\beta$ -alanine and chitosan derivative on *A. glycyphyllos* and *A. membranaceus* seed germination and seedling growth and development // *Agron. Res.* 2021. № 2. P. 484–495.
31. *Xu D., Li H., Lin L. et al.* Effects of carboxymethyl chitosan on the growth and nutrient uptake in *Prunus davidiana* seedlings // *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2020. № 4. P. 661–668.
32. *Khamidullina L.A., Tobysheva P.D., Rybina E.A. et al.* Plant growth biostimulants based on synthetic polyaminosaccharides // 2<sup>nd</sup> International Scientific Conference “Plants and Microbes: The Future of Biotechnology”. Saratov, 2020.
33. *Acemi A., Polat E.G., Çakir M. et al.* Molecular Weight and Concentration of Chitosan Affect Plant Development and Phenolic Substance Pattern in Arugula // *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*. 2021. № 2. P. 1–12.
34. *Dzung N.A., Khanh V.T.P., Dzung T.T.* Research on impact of chitosan oligomers on biophysical characteristics, growth, development and drought resistance of coffee // *Carbohydr. Polym.* 2011. № 2. P. 751–755.
35. *Majda M., Robert S.* The role of auxin in cell wall expansion // *Int. J. Mol. Sci.* 2018. № 4. 951.
36. *Lopez-Moya F., Escudero N., Zavala-Gonzalez E.A. et al.* Induction of auxin biosynthesis and WOX5 repression mediate changes in root development in Arabidopsis exposed to chitosan // *Sci. Rep.* 2017. № 1. 16813.
37. *Kolesnikova T., Puzyrev I., Khamidullina L. et al.* Chitosan derivatives: between nutrition and drug // 4th Russian Conference on Medicinal Chemistry with international participants “MedChem Russia 2019”. Ekaterinburg, 2019.

---

---

ЭТЮДЫ ОБ УЧЁНЫХ

---

---

## ИЗ ПЛЕЯДЫ ТИТАНОВ АТОМНОГО ВЕКА К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА А.П. АЛЕКСАНДРОВА

© 2023 г. **А. Ю. Гагаринский<sup>а,\*</sup>**

<sup>а</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*E-mail: [Gagarinsky\\_AY@nrcki.ru](mailto:Gagarinsky_AY@nrcki.ru)

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

13 февраля 2023 г. исполнилось 120 лет со дня рождения одного из главных героев атомной эпохи, трижды героя Социалистического труда, академика А.П. Александрова. Сейчас начинается возрождаться интерес к истории России, к науке и её выдающимся представителям, и наша цель — напомнить читателям ключевые этапы многогранной деятельности великого учёного и инженера в становлении и развитии атомной энергетики в нашей стране.

**Ключевые слова:** А.П. Александров, атомная наука и техника, морской флот, ядерная энергетика, атомный проект.

**DOI:** 10.31857/S0869587323070022, **EDN:** ZLUKUB

Академики И.В. Курчатов и А.П. Александров — одни из основоположников легендарного советского атомного проекта. Масштаб личности Игоря Васильевича — научного руководителя проекта, его выдающийся вклад в науку и оборонную способность СССР отражает монументальный памятник на площади Курчатова в Москве. К сожалению, он слишком рано скончался — в 1960 г., и институтом, названным в его честь, на протяжении почти 30 лет руководил его друг, сподвижник и продолжатель всех его дел — Анатолий Петрович Александров. Он смог не только развить направления, заложенные Игорем Васильевичем (от ядерной физики и реакторного материаловедения до генетики), но и дать старт целому ряду новых, ставших основой для многих отраслей промышленности, а также национальной безопасности нашей страны.

Они шли бок о бок 30 лет — начиная с 1930 г., когда молодой физик Игорь Курчатов познакомился во время своей командировки в Киев с таким же молодым и талантливым физиком Анатолием Александровым. По возвращении в Ленинград Курчатов порекомендовал его А.Ф. Иоффе, и с тех пор они стали вместе работать в легендарном Ленинградском физтехе. До начала Великой

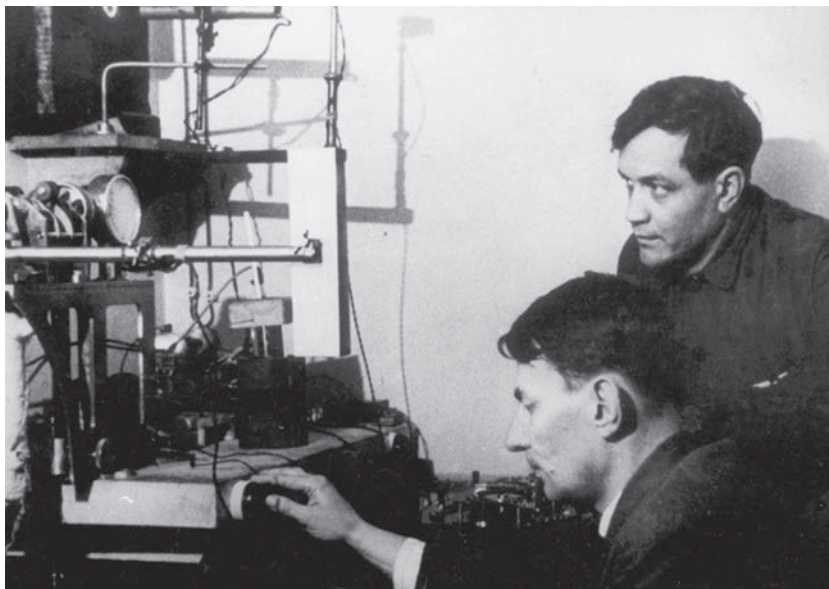
Отечественной войны каждый из них занимался своим научным направлением: Курчатов — физикой ядра, Александров — физикой полимеров. Безусловно, на протяжении всего этого времени



Анатолий Петрович Александров (1903–1994)

---

ГАГАРИНСКИЙ Андрей Юрьевич — доктор физико-математических наук, советник директора НИЦ “Курчатовский институт”.



А.П. Александров (сидит) с Б.А. Гасевым в лаборатории полимеров ЛФТИ, 1940 г.

они много общались, но первым их общим делом стало размагничивание кораблей летом 1941 г. в героически сражающемся Севастополе. Анатолий Петрович до конца дней считал эту работу, благодаря которой на магнитных минах не подорвался ни один советский корабль, самой важной в своей жизни.

И.В. Курчатова назначили научным руководителем советского атомного проекта, и в 1943 г. он уже призвал к сотрудничеству А.П. Александрова. Они были рядом во время всех ключевых событий первого этапа развития проекта: испытания первых атомной и термоядерной бомб, запуска первой АЭС в Обнинске, спуска на воду первенца советского атомного подводного флота подводной лодки “Ленинский комсомол” и первого в мире атомного ледокола “Ленин”. Решение задачи размещения в компактном пространстве множества технических устройств и приборов в рамках этих проектов во многом стимулировало развитие советской полупроводниковой промышленности.

При Анатолии Петровиче в 1960 г. Институт атомной энергии (ИАЭ) стал носить имя Курчатова, и Александров возглавлял это огромное научное объединение на протяжении 30 лет. Уникальный для отечественной науки факт: Александров совмещал колоссальную ответственность и нагрузку как директор Курчатовского института с руководством Академией наук СССР с 1975 по 1986 г.

Имя А.П. Александрова связано прежде всего с атомным флотом, “отцом” которого его по праву нарекли сами моряки. Именно благодаря ему в этой сфере (в частности, в атомном ледокольном флоте) СССР догнал и обошел не только США,

но и весь мир. Его огромная заслуга — переход атомной энергетики от первого, по сути, прототипа промышленного реактора, запущенного Курчатовым в Обнинске в 1954 г., до мощнейшей наукоёмкой отрасли, обеспечивавшей энергией потребности городов и крупнейших производств. В 1960–1980-е годы Александров создал сеть ядерно-физических институтов по всей стране. Он сочетал в себе уникальные способности организатора науки и научную интуицию. Возглавив АН СССР, он чётко выделил самые перспективные на тот момент направления: микроэлектронику, лазерные технологии, синхротронно-нейтронные и генетические исследования, введя их в круг государственных интересов. Именно поэтому облик современной российской науки во многом был сформирован А.П. Александровым.

В 1970-х — начале 1980-х годов во всём мире началось развитие микроэлектроники — гонка, в которой мы занимали хорошие позиции. Анатолий Петрович как президент АН СССР запустил государственную программу по развитию микроэлектроники, понимая, насколько она важна. В конце 1970-х годов в рамках развития новых перспективных технологических направлений по инициативе Е.П. Велихова и при поддержке А.П. Александрова был организован Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам в Шатуре. Здесь наряду с фундаментальными исследованиями разрабатывались технологические лазеры и соответствующая техника. В этот же период по инициативе Анатолия Петровича был дан старт созданию уникальной системы технологического накопительного комплекса “Литография рентгеновская на синхротронном ис-

точнике”. Для этого был построен промышленный синхротронный источник в Зеленограде (в Научно-исследовательском институте физических проблем им. Ф.В. Лукина, ныне входящем в состав НИЦ “Курчатовский институт”) и Курчатовский специализированный источник синхротронного излучения в Москве.

Важно подчеркнуть, что Александров возглавлял Академию наук долгих 11 лет. По мнению многих, он стал одним из лучших президентов АН СССР за всю её историю. Время его руководства академией совпало с расцветом науки и техники в Советском Союзе. Анатолий Петрович был высочайшим авторитетом и для руководства СССР, и для учёных. Именно в этот период по его инициативе и при поддержке руководства страны было создано множество новых институтов, ориентированных на развитие новой науки и технологий. В 1984 г. в АН СССР при непосредственном участии А.П. Александрова образовалось новое Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации, в котором занимались информационными технологиями, микроэлектроникой, а в дальнейшем — квантовыми технологиями и искусственным интеллектом.

Помимо того, что А.П. Александров был выдающимся учёным-инженером, он живо интересовался искусством. В 1950–1960-е годы, в период уникального явления в общественной и культурной жизни нашей страны — оттепели, большое значение приобрели дома культуры Курчатовского института, а также в Дубне, Обнинске и других закрытых в то время городах и посёлках. Именно там проходили уникальные встречи, общение учёных с писателями, поэтами, артистами и музыкантами. Курчатовский ДК был одним из самых известных площадок, на его сцене выступали лучшие представители советской культуры. Анатолий Петрович активно поддерживал это направление, покровительствовал ему. Именно поэтому сегодня дом учёных Курчатовского института носит его имя.

Академик, трижды герой Социалистического труда, президент АН СССР и директор Института атомной энергии — А.П. Александров обладал огромным авторитетом, был олицетворением советской науки и системы в целом. Неслучайно его избрали объектом гонений в связи с мнимой виной за аварию на Чернобыльской АЭС. Чернобыль стал в каком-то смысле не только технологической аварией, но и катастрофой всей советской системы, идеологической бомбой под СССР, исключительно удобной для раскручивания образа плохо управляемой страны, опасной для мира. Легендарная фигура Александрова оказалась одной из составляющих постчернобыльской истории. Он умер зимой 1994 г., в самый разгар “лихих девяностых” — провальных лет и для науки, и

для всей нашей страны. К сожалению, в последние годы его имя незаслуженно оказалось в тени, что связано с общим периодом безвременья, подмены жизненных ценностей, ориентиров для подражания у молодого поколения. Сегодня идёт процесс возвращения к истокам, возрождения интереса к истории России, к науке и её выдающимся деятелям.

Анатолий Петрович Александров — несомненно, ярчайшая личность, великий учёный, инженер, организатор науки и патриот, гордость и слава нашей страны. Нет необходимости пересказывать в статье всю его биографию, но ключевые этапы его многогранной деятельности и некоторые интересные эпизоды стоит напомнить современному читателю. Автор данной статьи, А.Ю. Гагаринский, много лет проработавший под руководством А.П. Александрова в Курчатовском институте, поделился здесь своими воспоминаниями. Также в неё вошли отрывки из воспоминаний самого Анатолия Петровича и его коллег о разных этапах их многогранной деятельности на благо страны и мира.

*Член-корреспондент РАН М.В. Ковальчук,  
президент НИЦ “Курчатовский институт”*

*Академик РАН Г.Я. Красников,  
президент РАН*

“Жизнь всегда должна наполняться интересной, напряжённой работой”.

*А.П. Александров*

**Александров и атомная бомба.** И.В. Курчатов привлёк А.П. Александрова к атомному проекту уже в 1943 г. Анатолию Петровичу было предложено заняться очень трудной составляющей проекта — одним из возможных направлений разделения изотопов. В своих воспоминаниях он писал: “Когда я уже всерьёз занялся урановой тематикой и перешёл под начальство Игоря Васильевича, у меня с ним был интересный разговор. Я тогда сказал ему, что согласен работать в этом направлении, но у меня есть два пожелания: не работать непосредственно над бомбой и раз в году иметь месячный отпуск” [1, с. 114]. Как подтверждал Александров, Курчатов согласился, и эти просьбы почти всегда выполнялись. Не осталось объяснений, почему он выдвинул условие про бомбу, а предположения и догадки вынесем за скобки.

Работы по термодиффузному разделению изотопов урана быстро показали его чрезвычайную энергоёмкость. Когда были чётко определены эффективные технологии решения проблемы разделения изотопов, Игорь Васильевич предложил Анатолию Петровичу включиться в задачу создания реакторов-наработчиков плутония, и эта провидческая идея в будущем определила



А.П. Александров (второй слева) с членами экипажа подводной лодки, 1936 г.

“атомный век Александрова”. Первый реактор-наработчик плутония был запущен Курчатовым в июне 1948 г., затем огромное дело по созданию реакторов плутониевой промышленности страны постепенно перешло к Александрову.

С 1946 г. А.П. Александров занимал пост директора Института физических проблем АН СССР, а весной 1948 г. был утверждён на должность заместителя начальника Лаборатории № 2 АН СССР и назначен научным руководителем промышленных реакторов-наработчиков оружейного плутония. В этот период завершались работы по монтажу первого промышленного реактора “А”. Следующий реактор разрабатывался уже под его руководством. Потом каждый год вводили по одному промышленному реактору, а то и по два. За 1948–1965 гг. было построено 13 промышленных уран-графитовых реакторов в Челябинске-40 (ныне — Озёрск), Томске-7 (ныне — Северск) и Красноярске-26 (ныне — Железногорск). Из них пять не только нарабатывали оружейный плутоний, но и снабжали электроэнергией и теплом Томск-7 и Красноярск-26 [1].

Все эти годы Александров как научный руководитель направления промышленных реакторов принимал непосредственное участие в вопросах их проектирования, пуска и эксплуатации. Он не боялся взять на себя ответственность за всё: от физики активной зоны и её конструктивной надёжности до оптимизации строительных конструкций, систем энерго- и водоснабжения. Таким образом, не занимаясь конструкцией ядерного оружия, учёный внёс огромный вклад в

создание для него делящегося материала — плутония — и продолжал научное руководство этой ключевой отраслью ядерной промышленности практически вплоть до достижения паритета ядерных арсеналов СССР и США.

**Александров и флот.** Анатолий Петрович вспоминал: “Это было очень давно, в 1933 году. Однажды ко мне в лабораторию пришёл Абрам Фёдорович Иоффе и привёл с собой двух моряков... Были приняты всякие меры для того, чтобы оградить гавани от подводных лодок... Было несколько случаев таких нападений на базы флота. Ну и стали эти гавани заграждать сетями... И речь пошла о том, чтобы для нашего флота, который в это время начали воссоздавать, для него разработать такие способы, чтобы лодки могли проходить через сетевые заграждения” [1, с. 56]. Тогда им был создан электродуговой прорезатель противолодочных сетевых заграждений “Сом”, испытанный в Севастополе и доказавший свою эффективность.

Затем возникла необходимость разработки методов защиты кораблей от мин, которая увенчалась успехом. Таким образом, ещё до начала Великой Отечественной войны метод обмоточного размагничивания был признан моряками и принят на вооружение к началу 1941 г., конечно, не без “сопротивления среды”. Об этом писал один из любимых учеников Анатолия Петровича, видный курчатовский физик Н.А. Черноплёков: «Его знаменитые работы по размагничиванию кораблей (защите от магнитных мин) были встречены “в штыхы” многими представителями командо-

вания флота и технических служб. А.П. пришлось приложить грандиозные усилия, чтобы преодолеть это. Коллектив ленинградских физтеховцев совместно с моряками осуществили грандиозную работу на многих флотах по размагничиванию и спасли не одну сотню кораблей. За это им великая честь» [2, с. 57, 58; 3–5].

Вскоре настала пора атомного флота, и Анатолий Петрович вспоминал: “Ну, например, идея сделать первую атомную подводную лодку у нас возникла ещё в институте Физпроблем, примерно в 48 году. Была сделана довольно подробная проработка, как может выглядеть реактор такой маленький, который легко уместить на лодке. Но нам это запретили делать тогда, чтобы концентрировать усилия на главной задаче. А потом, когда у нас всё это уже пошло, то разрешили действовать в этом направлении тоже. И вот тогда была разработана, ещё в институте Физпроблем, идея ядерного реактора высокотемпературного, с гелиевым охлаждением” [1, с. 168].

В 1950 г. в США была утверждена кораблестроительная программа, предусматривавшая строительство атомной подводной лодки: закладка “Наутилуса” состоялась в 1952 г., а ввод в эксплуатацию в 1954 г. Советское руководство не собиралось отставать. После успешного испытания первой советской атомной бомбы в 1949 г. начала разворачиваться работа по корабельным атомным энергоустановкам. В ноябре того же года научно-технический совет при Спецкомитете по инициативе И.В. Курчатова рассмотрел и поддерживал подготовленные в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН – так с 1949 по 1954 г. назывался Курчатовский институт) соображения о возможности создания атомного двигателя для кораблей (применительно к подводной лодке) в трёх вариантах: с водяным, газовым и жидкометаллическим охлаждением. Анатолий Петрович был назначен научным руководителем сектора, занимавшегося разработкой корабельных реакторов.

В июле 1952 г. И.В. Курчатов и А.П. Александров вместе с Н.А. Доллежалем обратились в Правительство СССР с предложением приступить к разработке и созданию первой отечественной подводной лодки с энергосиловым комплексом, использующим атомную энергию. Здесь уместно снова обратиться к воспоминаниям Анатолия Петровича: “Мы начали заниматься этим осенью 52 года, когда я подстрелился и лежал в больнице... В это время как-то приехал ко мне Игорь Васильевич и сказал, что, значит, эту тематику мы сейчас имеем право развивать... Меня назначили руководителем этих работ. Мы начали в 52 году, осенью. Причём начали в высшей степени нахально. Значит, назначили нам такое СКБ во главе с Перегудовым Владимиром Николаевичем. Очень, надо сказать, толковый кораблестроитель был, замечательный. И имевший такой настоя-

щий опыт подводника, потому что он участвовал в испанской войне как подводник. И вот, мы с ним начали работать. И поначалу было очень смешно. Мы ничего не должны были сообщать им о наших устройствах для начала. Но мы ещё сами не знали, как мы будем делать. Но чтобы всё дело развивалось, мы с ним договорились так: вот мы оставляем такое белое место на чертеже, в этом белом месте будет сидеть наша установка, она будет весить столько-то тонн, и она будет иметь центр тяжести вот в этой точке, а оттуда будет выходить труба-паропровод, даже два паропровода, которые, значит, нужно будет цеплять к турбине... В начале разработки мы перебрали, вероятно, два десятка разных вариантов реактора. Очень трудно было сказать, на каком из них остановиться” [1, с. 168, 169]. В итоге, когда началась разработка идеи реактора с водяным замедлителем на сильно обогащённом топливе (кстати, Анатолий Петрович писал: “Но у нас в это время не было никаких сведений относительно того, какое решение приняли американцы” [1, с. 169]), уже первые успешные шаги привели к дальнейшему развитию проекта.

Первоначально основной задачей экспериментального корабля ставилось нанесение ударов по прибрежным районам вероятного противника, для чего проектировалась фантастическая торпеда калибра 1550 мм, способная нести термоядерный заряд тогдашних габаритов. В окончательном варианте лодка была снабжена торпедным оружием, предназначавшимся для борьбы с боевыми кораблями на океанских коммуникациях. Закладка первой в СССР атомной подводной лодки (АПЛ) состоялась в сентябре 1955 г., а знаменитая запись в вахтовом журнале “впервые получен пар без угля и мазута” была сделана в апреле 1958 г. Как точно подметил первый помощник Анатолия Петровича во всех его последующих флотских делах Н.С. Хлопкин, “на флоте был произведён технический переворот, аналогичный переходу от парусного флота к паровому” [6, с. 581].

А.П. Александров в своих воспоминаниях фактически описал момент, когда из создателя первого атомного двигателя для подводной лодки он превратился в “отца атомного флота” страны: “И лодку в 57 году спустили на воду... Чрезвычайно важно было тогда то, что мы могли, и не имея доказательств, но просто по нашему убеждению – если мы считали, что что-то уже стоит пускать в промышленность, то, хотя опыты у нас ещё не готовы, но мы считаем, что они кончатся так-то и так-то, нам это разрешалось. Мы – это Игорь Васильевич, я, Ванников тот же, Малышев, Славский, Первухин. Вот вся эта компания. Если мы выходили с решением Совета, что вот сделать такую-то вещь, то нам это подтверждали. Когда мы строили первую лодку, то мне был задан вопрос – как я считаю, можно ли переходить к строитель-

ству серии. Я сказал так: Надо иметь в виду, что никакого опыта по работе установки нет. Я убеждён в том, что в ней кое-что окажется плохим, и придётся его заменить. Но я убеждён также в том, что основа вся останется. И поэтому считаю, что нет риска строить серию. И стали строить серию. У нас на следующий год после спуска первой лодки было уже четыре лодки” [1, с. 171].

Разумеется, при эксплуатации АПЛ с паропроизводящими установками ВМ-А первого поколения выявились изъяны (недостаточная надёжность парогенераторов и малый энергетический запас реакторов, приводившие к частым перегрузкам ядерного топлива), потребовавшие от научного руководителя быстрых решений. Но уже к середине 1960-х годов и в установке ВМ-А, и в реакторах следующих поколений главные недостатки были устранены. Всего до конца 1960-х годов было построено 55 лодок первого поколения. Монополия США в этой области военной техники была ликвидирована. При этом Александров был научным руководителем не только работ по созданию ядерных установок, но и огромного комплекса других разработок, сопутствующих рождению кораблей нового класса, — от вооружения, гидроакустики, кораблестроительных вопросов вплоть до дизайна кают личного состава.

В непрекращающейся гонке вооружений от каждого последующего поколения АПЛ требовались повышенные водоизмещение и мощность энергетических установок, обусловленные новыми видами оружия и габаритами ракетных отсеков. Головной корабль второго поколения вошёл в состав флота в 1967 г. Его водоизмещение составляло уже 9,6 тыс. т против 5 тыс. т у проектов первого поколения. Для второго поколения была разработана своя реакторная установка ВМ-4 с повышенными надёжностью и ресурсом работы. Таким образом, каждое (в том числе и последующие) поколение имело свою унифицированную реакторную установку — блестящее достижение её создателей и научного руководителя, оказавшее огромный экономический эффект на судостроительную промышленность. Серийное строительство лодок второго поколения продолжалось до 1992 г. Они остались служить флоту и в XXI в.

В начале 1970-х годов была устранена необходимость преодоления рубежей противолодочной обороны. Создание межконтинентальной ракеты морского базирования позволило АПЛ совершать боевое патрулирование в прилегающих к территории СССР морях. Подводные ракетносцы стали наименее уязвимым компонентом стратегических сил. Реакторная установка ОК-650 мощностью 190 МВт (для сравнения, мощность установок предыдущих поколений — 70–90 МВт) обеспечила атомоходу высокую подводную скорость, а системы шумоподавления сделали его са-

мым “неслышимым” из советских АПЛ. В 1976–1989 гг., то есть ещё при жизни Анатолия Петровича, было построено шесть АПЛ этого поколения. Он действительно был создателем трёх поколений атомного флота страны, и сейчас, когда реальные очертания приобретает уже пятое поколение, моряки всё ещё помнят, кто заложил основы отечественного атомного флота.

Когда в США и СССР появились первые атомные подводные лодки, рождение надводных атомных судов стало только делом времени. Первый в мире атомоход “Ленин” был принят в эксплуатацию в декабре 1959 г. Американский атомный крейсер “Лонг-Бич” вошёл в состав флота в 1961 г. Подписанное в 1953 г. постановление Совмина СССР о проектировании и строительстве атомного ледокола для Арктики, подготовленное, естественно, по предложению И.В. Курчатова, А.П. Александрова и руководителей отечественной промышленности, имело любопытную предысторию. По описанию Б.Г. Пологих — одного из главных помощников Александрова в этом деле: “22 мая 1947 г. Правительство приняло новый план, предусматривающий создание мощных ледоколов, способных обеспечить сквозное плавание по Северному морскому пути транспортных судов... В 1948 г. работа над проектом ледокола приближалась к завершению... но уже в 1950 г. всё это было остановлено. В связи с начавшимся периодом холодной войны ЦКБ было прекращено на создание крейсеров... В 1953 г. у нас уже полным ходом шли работы по созданию атомной подводной лодки... Создавалась уверенность, что реакторы аналогичного типа можно будет с успехом применять на судах мирного назначения. Именно это и позволило выйти с предложением о строительстве атомного ледокола” [7, с. 99]. Естественно, научным руководителем был назначен академик А.П. Александров.

Кстати, в числе нескольких рассматриваемых вариантов гражданского атомного судна была даже сохранившаяся в истории экзотическая идея — снабдить атомным двигателем флагман китобойной флотилии. Пресекло её, по-видимому, нежелательно близкое соседство мирного атома и получаемой продукции. В итоге остановились на атомном ледоколе, и это решение стало судьбоносным.

Когда весной 1956 г. с трибуны XX съезда КПСС И.В. Курчатов вызвал оживление в зале информацией о техническом проекте ледокола с атомным двигателем, который “будет проводить суда по Северному морскому пути, взламывая лёд, без пополнения топливом в течение 2–3 лет” [8, с. 469], его закладка на стапеле Адмиралтейского завода в Ленинграде уже была близка. Осенью 1958 г. состоялась II Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии, где А.П. Александров представил блестящий, по об-



Анатолий Петрович Александров и Игорь Васильевич Курчатов, 1956 г.

шему мнению, доклад о создании атомного ледокола. Особый интерес вызвало решение построить атомное судно без предварительной отработки ядерной энергетической установки на стенде-прототипе. На это Александров отвечал: «На ледоколе три реактора, и в случае отказа одного из них ледокол своим ходом может выйти из льдов. Конечно, риск есть, но ведь без риска и жениться нельзя» [9, с. 192].

Атомное ледоколостроение с Анатолием Петровичем во главе двигалось дальше, но этот путь не был лёгким. Первенец — ледокол «Ленин» — за 30 лет прошёл более 650 тыс. миль и провёл во льдах около 4 тыс. судов. Половину своего срока эксплуатации он был единственным гражданским атомоходом в Северном Ледовитом океане. Однако к концу «вахты» первого гражданского судна с ядерным двигателем советский атомный флот располагал уже восемью ледоколами и одним грузовым атомным судном — лихтеровозом «Севморпуть». В этом, несомненно, состоит огромная заслуга Александрова перед советским народом. Ему принадлежат слова, сказанные в дни расцвета наземной ядерной энергетики (1976): «Работы, связанные со строительством атомного флота, вот уже 40 лет являются главным делом в моей жизни и останутся таковыми до конца дней моих» [9, с. 411].

**Александров и ядерная энергетика.** В ноябре 1949 г., практически сразу же после первого испытания советской атомной бомбы, главный штаб атомного проекта страны Специальный комитет при Совете министров СССР выдаёт пору-

чение: «В целях изыскания возможностей использования атомной энергии в мирных целях (возможности разработки проектов силовых установок и двигателей с применением атомной энергии)... рассмотреть вопрос о возможных направлениях работ в этой области и свои соображения в месячный срок доложить Специальному комитету» [10, с. 9].

Список учёных, которым это было поручено, естественно, возглавил И.В. Курчатов — лидер атомного проекта, следом за ним А.П. Александров — научный руководитель почти всех имевшихся тогда в стране реакторов. После этого понадобилось около пяти лет, чтобы построить первую в мире атомную электростанцию. Анатолий Петрович писал: «Тогда многие энергетики смеялись над «игрушкой физиков», даже многие участники атомных разработок считали, что это бесперспективно. Однако Игорь твёрдо верил в будущее атомной энергетики» [9, с. 37].

В 1956 г. на историческом XX съезде КПСС И.В. Курчатов выступил с исключительно смелой программой создания в стране полномасштабной ядерной энергетики. А в это время в отделе ядерных реакторов А.П. Александрова уже вовсю шла разработка проектов ядерных реакторов для электростанций. Первые предложения по водо-водяному реактору для АЭС (на базе развернувшихся работ по атомной подводной лодке) появились в 1954 г. Курчатов и Александров, когда у них была такая возможность, шли плечом к плечу в деле создания советской ядерной энергетики. Так, конечно, было и в тяжёлый период, который спра-



И.В. Курчатов и А.П. Александров с дочкой

ведливо назвать “последним боем Курчатова”. Они вели его вместе.

В начале 1959 г. председатель Госплана СССР предложил практически свести на нет и без того скромную программу, в которой оставалось не более половины продекларированного XX съездом. Госплан хотел сократить количество строящихся реакторов с двух до одного, перенести сроки, а потом и совсем свернуть строительство Нововоронежской АЭС. Всё это было неслучайным в условиях острой нехватки ресурсов, что отлично понимали в Правительстве. Фактически это означало отложенный конец всей рождающейся ядерной энергетики страны. Были задействованы все аргументы, способные доказать ошибочность предлагаемого решения. Интересно, что наиболее важные письма Курчатова и Александров подписывали вдвоём — видимо, эта тактика была эффективной. Таким оказалось и самое результативное, как потом выяснилось, обращение к А.Н. Косыгину. Приведём выдержку из главного и последнего (июнь 1959 г.) совместного обращения: “Необходимо рассматривать Воронежскую АЭС как опытно-промышленную установку, открывающую дорогу крупному направлению атомной энергетики — водо-водяным реакторам. В этом направлении мы имеем уже опыт... Мы считаем, что это направление атомной энергетики должно иметь большое будущее... Учитывая всё изложенное, мы настаиваем на продолжении начатого строительства Воронежской станции” [11, с. 28]. Категорический вывод в письме к Косыгину о том, что строительство Нововоронежской станции и изготовление оборудования для неё зашли

настолько далеко, что прекращение строительства было бы технически и экономически нецелесообразно, вероятно, сыграл решающую роль в победе. Итог мы знаем, и это стало прощальным подарком Курчатова будущим поколениям атомщиков.

Первый блок Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-210 (кстати, самым мощным на тот момент энергетическим реактором в мире) был запущен под руководством Анатолия Петровича в 1964 г., уже без Игоря Васильевича. В дальнейшем именно Александров смог поднять мирный атом до уровня неотъемлемой части энергетического потенциала страны. Сегодня энергию производит уже шестой блок Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-1200. Благодаря тому, что в конце 1950-х годов удалось продолжить работы по корпусным водоохлаждаемым реакторам, это направление и сегодня выступает лицом российской ядерной энергетики.

Следует добавить, что в период подготовки к пуску первого блока Нововоронежской АЭС (1964) А.П. Александров озабочился тем, чтобы внедрить на станции опыт, полученный при создании и освоении атомных подводных лодок и ледоколов. Жёсткие рамки секретности исключали доступ специалистов гражданской энергетики к важным знаниям корабельного направления. Часто единственным каналом передачи соответствующих сведений были рекомендации Анатолия Петровича. Однако опытом эксплуатации установок подводных лодок воспользоваться всё же удалось: при подготовке первой группы научных руководителей энергопуска первого блока

Нововоронежской АЭС четыре “гражданских атомщика” Курчатовского института прошли полную подготовку на рабочем месте старшего инженера-оператора реактора на наземном прототипе подводной лодки.

Разумеется, знания и опыт, накопленные при эксплуатации промышленных реакторов-наработчиков оружейного плутония, научным руководителем которых, как отмечалось выше, стал Александров, были взяты на вооружение при становлении отечественной ядерной энергетики. На этом базировалась и разработка реактора АМ для первой АЭС. Тогда же рассматривались направления двухцелевых реакторов, которые могли бы сочетать выработку электроэнергии и накопление плутония. Первый такой реактор, ЭИ-2, создан в 1954–1958 гг.

Развитие принципиальных конструктивных решений, внедрённых на Обнинской АЭС, в итоге ограничилось двумя реакторами (не считая небольшой опытной атомной теплоцентрали на Чукотке — Билибинской АЭС). Это были два блока типа АМБ Белоярской АЭС мощностью 100 и 200 МВт. Блоки проработали с 1963 по 1983 г. и с 1967 по 1990 г. соответственно.

Создание бескорпусных канальных водо-графитовых реакторов пошло по несколько иному пути. А.П. Александров стоял у истоков нового реакторного направления, начало которому было положено уже после смерти И.В. Курчатова. Его концепция была предложена в ИАЭ до 1965 г. профессором С.М. Фейнбергом при участии Анатолия Петровича. В СССР в то время имелся уникальный опыт создания и эксплуатации канальных промышленных уран-графитовых, а также транспортных и первых энергетических корпусных водо-водяных реакторов. Однако не хватало мощностей для массового производства предельно крупных транспортабельных корпусов и парогенераторов ВВЭР.

В Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова совместно с Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники была выработана первая концепция энергетического канального водо-графитового реактора с учётом отечественного и мирового опыта, позволявшая, в частности, радикально расширить производственную базу ядерной энергетики благодаря отказу от уникальных корпусов реакторов и тяжёлых парогенераторов. Разумеется, для принимавших тогда решения лиц очень важна была возможность (впрочем, впоследствии не реализованная) двухцелевого режима таких реакторов с наработкой оружейного плутония. В результате в Постановление Совета Министров СССР 1966 г. о масштабных планах строительства АЭС до 1975 г. было уже включено серийное производство реакторов РБМК даже без предварительного создания реактора-прототипа. Первый блок



А.П. Александров с министром среднего машиностроения Е.П. Славским, конец 1970-х годов

РБМК-1000 на Ленинградской АЭС вошёл в строй в 1973 г., а к 1978 г. было введено уже шесть блоков РБМК. Такая спешка повлекла за собой проектные ошибки, не все из которых удалось устранить модернизацией уже строящихся и эксплуатируемых АЭС. После успешного освоения головных блоков на Нововоронежской и Белоярской АЭС появилась реальная база для первого амбициозного плана — ввода в действие атомных станций мощностью около 12 млн кВт в период 1966–1975 гг. Научное руководство работами по водо-водяным реакторам ВВЭР и водо-графитовым реакторам возложили на Курчатовский институт, а министр среднего машиностроения Е.П. Славский назначил А.П. Александрова научным руководителем.

Здесь уместно привести описание стиля научного руководства Анатолия Петровича, данное выдающимся учёным в области ядерной энергетики В.А. Сидоренко: «Если Игорь Васильевич Курчатов в повседневной работе над проектами промышленных ядерно-энергетических установок уже не участвовал (что вовсе не исключало его постоянное внимание к работе, влияние на принципиальные научно-технические решения и самое решительное вмешательство в реализацию, развитие и признание ядерной энергетики и создание её головных объектов), то Анатолий Петрович Александров укреплял авторитет научного

руководства детальным и постоянным участием в решении всех проблем создаваемых конструкций. Его эрудиции хватало на всё, это был “Инженер” с большой буквы, создававший вокруг себя научно-инженерную школу высокого уровня и высокой ответственности. Характерным в его стиле “руководства” было то, что Анатолий Петрович мог одобрить результат работы, лишь лично проследив каждую линию на чертеже и каждый вывод в обосновании решения. От этого стиля работы ему трудно было отойти даже в условиях резко увеличивающегося объёма работ, увеличения количества разрабатываемых объектов. Он понимал необходимость, но с трудом воспринимал реальность создания “системы”, обеспечивающей столь же ответственное внимание к качеству результата разработки. Такая система создавалась жизнью, но, к сожалению, это его беспокойство за эффективность “системы” в последующем во многом оправдывалось» [12, с. 8].

Общее руководство ядерной энергетикой от научных разработок до строительства и эксплуатации (борьба за передачу станций в другое ведомство была ещё впереди) тогда осуществляло Министерство среднего машиностроения (так было переименовано Главное управление времён атомного проекта в 1953 г.). Под руководством министра Средмаша Е.П. Славского удалось создать ядерный и термоядерный арсенал, обеспечивавший паритет с США. Усилиями отрасли были развиты основные направления ядерной науки и технологии и разнообразные области использования атомной энергии: исследовательские установки, военный и гражданский флот, ядерная энергетика и многое другое. На развитие всех этих направлений огромное влияние оказал академик Александров.

В конце 1970-х годов в Советском Союзе готовилась новая программа развития ядерной энергетiki. Она была принята в 1980 г. и предусматривала ввод в 1981–1990 гг. 67 млн кВт атомных мощностей, а также ставила задачу к 1993 г. довести мощности АЭС до 100 млн кВт. С ориентиром на этот огромный уровень ядерной энергетiki начались работы по развитию предприятий ядерного топливного цикла и атомного энергомашиностроения. Программа предусматривала обеспечение всего прироста производства электроэнергии в европейской части страны за счёт ядерных энергоисточников. Тогда было реализовано около 29 ГВт ядерных мощностей (менее половины запланированных к 1993 г.), заметная часть которых “ушла” в другие страны. Этому предшествовала работа по формированию общей стратегии развития ядерной энергетiki, определению её технических направлений и способов обеспечения топливом. Александрову как авторитетному носителю этой идеологии было доверено представить ядерно-энергетическую стратегию мировому сообществу в Генеральном адресе

(программном докладе) VII Мировому энергетическому конгрессу, впервые состоявшемуся в Москве [13].

Авторитет А.П. Александрова как научного руководителя ядерной энергетiki страны проявился и в создании Межведомственного технического совета по атомным электростанциям, учреждённого постановлением Совета министров СССР в 1971 г. Анатолий Петрович был утверждён его председателем. Совет имел право принимать решения, исполнение которых было обязательным для всех министерств и предприятий. В его состав вошли первые руководители ведущих министерств и организаций, связанных с ядерной энергетикой: 5 министров (и председателей госкомитетов) СССР, 10 академиков и членов-корреспондентов АН СССР, 19 руководителей НИИ, КБ и проектных организаций. До осени 1986 г. совет рассматривал и решал важнейшие вопросы технической политики в области ядерной энергетiki как в стране, так и в международном сотрудничестве, и это стало периодом расцвета атомной отрасли.

Здесь необходимо подчеркнуть ещё одну принципиально важную особенность “периода Александрова” в развитии мирного атома – бурное рождение и развитие новых идей, результатами которых мы пользуемся по сей день. Вот лишь несколько примеров новых направлений ядерной техники, энергично развивавшихся под руководством А.П. Александрова в институте в период застоя (не сумевших, впрочем, прорваться в атомную отрасль). Одним из настойчиво продвигаемых направлений 1970–1990-х годов стали высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Закрытые работы по газографитовым реакторам для ядерных ракетных двигателей в США и СССР начались ещё в 1950-х годах. Задание на экспериментальный реактор, получивший название ИВГ-1, было утверждено Александровым в 1965 г. Этот уникальный аппарат был запущен в 1972 г. на Семипалатинском полигоне с рекордной температурой выбрасываемого водорода 3000 К.

Разумеется, Анатолий Петрович прекрасно понимал состояние оборонной части проблемы, продвигая и мирное использование высокотемпературных реакторов для придания нового качества ядерной технологии – внедрения её в энергоёмкие отрасли промышленности: расширенное применение ядерного водорода, реализация высокоэффективных циклов когенерации тепла и электроэнергии и др. Дело продвинулось довольно далеко: были разработаны проекты высокотемпературных реакторов в широком диапазоне мощностей от 200 до 2500 МВт (тепловых). Некоторые из них были близки к реализации. Эта перспектива в нашей стране (в отличие от Китая) до сих пор находится пока в листе ожидания.

Другое, к сожалению, основательно забытое всеми (опять-таки кроме Китая) направление, доведённое до практического сооружения головной станции, — одноцелевые атомные станции теплоснабжения. Идея атомного теплоснабжения базировалась на вполне понятных основаниях. В нашей северной стране на производство горячей воды и пара (так называемого низкотемпературного тепла) расходуется в полтора раза больше топлива, чем на производство электроэнергии. К тому же Россия — одна из немногих стран, где существует развитое централизованное теплоснабжение городов. Общая концепция специализированного источника теплоснабжения АСТ, позволяющего экономить органическое топливо при значительном снижении выбросов продуктов сгорания в районах сосредоточения людей, разработана в 1975–1978 гг. Первопроходцем здесь, как и во многих других новых технологиях, стал Курчатовский институт. Новые подходы к обеспечению безопасности атомных станций позволили разработать одноцелевую атомную станцию для низкопотенциального теплоснабжения.

Строительство двухблочной Горьковской АСТ началось в январе 1982 г. (второго блока — с 1983 г.) в нескольких километрах к востоку от городской черты Горького (ныне — Нижний Новгород) и было официально остановлено в декабре 1993 г., когда первый блок был практически готов к эксплуатации. Возведение Воронежской АСТ, также двухблочной, началось в 1983 и 1985 г. (первый и второй блоки соответственно) и было прекращено летом 1990 г. Причиной тому стала, без сомнения, волна антиядерных настроений в стране после аварии на Чернобыльской АЭС, активно подогреваемая политической конъюнктурой.

В наши дни близится к возрождению ещё одно направление тех лет — водородная энергетика, для которой в институте утвердилось название “атомно-водородная энергетика”. Александров очень много сделал для его развития. Основными проектами стали ядерно-металлургический комплекс на Кольском полуострове с восстановлением руды водородом и, несколько позднее, плазменная переработка сероводородсодержащих газов. Можно упомянуть ещё об одном интереснейшем проекте — авианосце “Икебана”, производящем водород для заправки самолётов. Надо сказать, что Анатолий Петрович готовил широкий прорыв атомно-водородной энергетике на флоте. Но во все эти проекты вмешалась перестройка с последующим развалом СССР.

Трагедия Чернобыля для человека, всю жизнь отдавшего ядерной энергетике, стала страшной бедой: “Чернобыль — трагедия и моей жизни тоже. Я ощущаю это каждую секунду. Когда катастрофа произошла, и я узнал, что там натворили, чуть на тот свет не отправился. Потом решил немедленно уйти с поста президента Академии наук, даже обратился по этому поводу к М.С. Горба-

чёву. Коллеги останавливали меня, но я считал, что так надо. Мой долг, считал я, все силы положить на усовершенствование реактора. Отвечать за развитие атомной энергетики и конкретно за Чернобыльскую катастрофу — разные вещи. Судите сами. Хотя, впрочем, убеждён, что сказанное вызовет новый поток брани на мою старую, лысую голову. Но я покривил бы душой, если бы согласился с мнением, что теперь атомную энергетику развивать не надо, и все АЭС следует закрыть. Отказ человечества от развития атомной энергетики был бы для него губителен” [1, с. 243, 244].

А.П. Александров не только переживал трагедию Чернобыля, но и немедленно включился в тяжёлую и непрерывную работу. С первого дня катастрофы в Курчатовском институте организовали антикризисный штаб, прямо в кабинете директора. В него вошли практически все ведущие специалисты института. Именно здесь под внешним спокойным и так хорошо знакомым всем курчатовцам бесконечно требовательным аналитическим взглядом Анатолия Петровича непрерывно “переваривалась” вся, сначала очень скудная, информация “с фронта”, и находились решения, немедленно приводившиеся в жизнь. В этом штабе бывали и руководители отрасли Е.П. Славский, Л.Д. Рябев и многие другие. Нет нужды говорить, что был мобилизован весь институт (уникальные возможности национального ядерного центра в чрезвычайных ситуациях — один из важных уроков Чернобыля), все его небольшие по сегодняшним, но огромные по тогдашним меркам вычислительные возможности. Когда было надо, стремительно ставились эксперименты. Начиная с мая 1986 г. академик, которому было уже 83 года, неоднократно прилетал в Чернобыль, чтобы лично проконтролировать работы. Для людей, занятых устранением последствий аварии, каждая встреча с ним, отчёт о сделанном, обсуждение задач превращались в серьёзную проверку на прочность, выдержав которую, можно было быть уверенным в успехе задуманного.

Постепенно утихли страсти. Отшумели споры о причинах Чернобыльской аварии. Специалисты практически договорились о технических деталях произошедшего, особенно когда время нивелировало фактор “чистоты мундира” отдельных участников и организаций. Как это типично для больших аварий, всё свелось к наложению человеческого фактора на недостатки техники, каковые, по своей сути, — тот же фактор в виде “отложенного штрафа”, результат ошибок или недостатка знаний у людей, когда-то спроектировавших эту технику.

Стоит добавить, что Чернобыль (как до него авария на АЭС Три-Майл-Айленд в США в 1979 г.) подтвердил известную истину, что тяжёлые аварии могли бы быть предотвращены достаточно простыми техническими решениями, если только знать, где подстелить соломки. Такие пер-

воочередные меры, в поиске которых Анатолий Петрович принимал активное участие и реализованные на всех АЭС с реакторами РБМК, практически за год физически устранили возможность повторения чернобыльского сценария.

Обратимся к ещё одному уже упоминавшемуся обстоятельству, часто остающемуся в стороне при постчернобыльских обсуждениях. РБМК — это первый советский опыт запуска в серийное производство мощного реактора без предварительного физического моделирования и постройки реактора-прототипа малой мощности. Первый блок РБМК-1000 вошёл в строй в 1974 г., к 1981 г. их было уже пять. Столь быстрое внедрение вскрыло проектные ошибки, последовал ряд довольно серьёзных инцидентов в 1970-х годах и, наконец, в 1986 г. У РБМК всё-таки другие физические характеристики, и именно они определили катастрофический разгон. Вот здесь проявилось мужество А.П. Александрова как человека и учёного. Он, по словам Н.А. Черноплёкова, “стал выше личных обид, которые только и могла породить развязанная в СМИ травля, а обратил внимание и организовал работу по совершенствованию реакторов РБМК, стремясь защитить их от возможной безответственности и халатности персонала. А самое главное — он делал всё от него зависящее для ликвидации последствий чернобыльской аварии. Когда в обществе занимались преимущественно похоронами ядерной энергетики, он мужественно и обоснованно выступил в её защиту” [14, с. 164]. Анатолий Петрович говорил: “Меня очень тревожит гонение на атомную энергетику, которое началось в стране. Не может целая отрасль науки и промышленности быть подвергнута остракизму. В этом отношении есть отрицательный опыт с генетикой и кибернетикой. Я по-прежнему убеждён в необходимости развития для страны атомной энергетики. Убеждён, что при правильном подходе к ней, при соблюдении всех правил эксплуатации она безопаснее, экономически надёжнее тепловых станций, загрязняющих атмосферу, гидростанций, уродующих реки” [1, с. 245].

**Александров и сегодняшний день российского атома.** Современный атомный военно-морской флот — надёжный гарант безопасности Российской Федерации. Вся страна знает о регулярно спускаемых на воду многоцелевых подводных лодках и стратегических атомоходах (в 2022 г. прошёл испытания уже шестой корабль этого класса — ракетный крейсер стратегического назначения “Генералиссимус Суворов”). Люди, которые профессионально этим занимаются, прекрасно помнят об актуальных по сей день идеях и всём, что было создано за полвека “отцом” данного направления. Один из главнокомандующих ВМФ, адмирал В.И. Куроедов, назвал Анатолия Петровича Александрова “первым, кто прорвал занавес, отделяющий большую науку от флота”.

Как он подметил: “Стиль взаимодействия Анатолия Петровича с флотом... является образцом сотрудничества учёного с флотом и для сегодняшнего поколения” [15, с. 25].

Многое из того, что сегодня относят к новым направлениям, берёт своё начало со времён Александра и его соратников. Понятно, что происходящее на флоте далеко не всегда предназначено для открытого опубликования. При необходимости разрешение даёт Верховный главнокомандующий, но связь времён на флоте очевидна. Рассмотрим, насколько связан современный день мирного атома с основами, заложенными Анатолием Петровичем. Если мы откроем его Генеральный адрес из далёкого 1968 г., то в числе “нескольких соревнующихся технических концепций использования энергии деления” первыми обозначены “хорошо зарекомендовавшие себя корпусные реакторы с лёгкой водой, особенно развивающиеся в США и Советском Союзе” [13].

Мы, конечно, понимаем, что их родина — Курчатовский институт, а внедрением первого промышленного образца руководил А.П. Александров. Сегодня эти реакторы, изначально спроектированные для атомных подводных лодок и надводного флота, обеспечивают 85% мирового ядерного электричества. Исключительно успешный опыт мирового использования реакторов с водой под давлением сделал эту технологию ведущей в развитии мирного атома на всей планете, хотя когда зачитывался Генеральный адрес академика Александрова, это было далеко не так очевидно. И нет никаких оснований ожидать смены тенденции превалирования корпусных водяных реакторов в ядерной энергетике России и мира.

Что же касается “развёртывания энергетики с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах, использующих большую часть урана-238... практически неисчерпаемых энергоресурсов ядерного горючего” [16, с. 38], если сравнить Генеральный адрес Александрова и современную “Стратегию развития ядерной энергетики”, легко убедиться, что ядерные специалисты шли по одному пути на протяжении всех этих десятилетий. Просто Анатолий Петрович, как и все творцы, ожидал от дела своей жизни немного большей скорости развития, чем это почти всегда происходит в реальности.

Место, которое сегодня занимают быстрые реакторы в реальной энергетике, а также в исследованиях и разработках, отражает сроки прогнозируемой потребности в них, определяемые прежде всего необходимостью вовлечения урана-238 в ядерный топливный цикл. Согласно последним данным, имеется достаточно урановых ресурсов для поддержки долгосрочного и устойчивого использования ядерной энергии. Современная оценка соотношения спроса и предложения на уран снова отодвинула на середину века поиск

новых источников топливообеспечения. Перенос востребованности вторичного ядерного топлива ещё на несколько десятилетий вперёд явно не стимулирует интенсивное развитие “быстрого” направления, сколько бы доводов о его преимуществах ни приводилось.

Широкое внедрение реакторов на быстрых нейтронах и замыкания на их основе ядерного топливного цикла в существующих российских стратегических планах отнесено на 2030-е годы, что может оцениваться как традиционный максимализм при нынешних, весьма умеренных представлениях о росте потребности в ядерной генерации. Россия, единственная в мире имеющая в составе ядерного парка коммерческие реакторы на быстрых нейтронах, явно лидирует по темпам развития этой технологии.

Не может не восхищать совпадение принципиальной позиции Александрова, пронизывающей весь его Генеральный адрес и многие другие работы (о необходимости и неизбежности внедрения ядерной энергии в новые области энергопотребления), с возрождением этой идеи в наши дни. В последнее время развернулись буквально взрывные дебаты о предстоящем выходе мирного атома за пределы электрогенерации (теплоснабжение, опреснение, производство водорода и др.) при нынешнем практически пренебрежительно малом вкладе атомной энергии в неэлектрическое производство — порядка 1%. Это, пожалуй, наиболее значимая отличительная черта современного этапа ядерно-энергетического прогресса — возрождение тенденции, ослабленной трудным временем мирного атома после тяжёлых аварий, но не забытой, его стремления к распространению в новые области энергопотребления. Огромный вклад академика А.П. Александрова в этот процесс никто не осмелится отрицать.

Конечно, неумолимо рождаются новые идеи в области атомных технологий — гигантская теплотворная способность ядерного топлива всегда будет стимулом для творческой мысли. Надо только обязательно проверять, как относились академик Александров и его команда к рождённой, казалось бы, сегодня новой идее, обсуждение которой почти всегда найдётся в анналах его родного института.

Завершить эту статью хочется заветом Анатолия Петровича: “Мне в жизни повезло — я жил в необычайно интересное, хотя и очень трудное время, мне приходилось участвовать в работах крупного значения и взаимодействовать с многими удивительными людьми... Работа моя была очень разнообразна, но всегда увлекала меня полностью... Жизнь всегда должна наполняться интересной, напряжённой работой, тогда она будет счастьем” [17, с. 277].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров П.А. Академик Анатолий Петрович Александров. Прямая речь. М.: Наука, 2002.
2. Курчатовцы и атомный флот // Серия “Исследования и разработки Курчатовского института в интересах национальной безопасности” / Гл. ред. М.В. Ковальчук, сост. А.Ю. Гагаринский, Е.Б. Яцишина. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2017.
3. Курчатовские реакторы // Серия “Исследования и разработки Курчатовского института в интересах национальной безопасности” / Гл. ред. М.В. Ковальчук, сост. А.Ю. Гагаринский, Е.Б. Яцишина. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2017.
4. Папковский Б.П. Курчатовский институт и отечественная судовая атомная энергетика // Серия “Исследования и разработки Курчатовского института в интересах национальной безопасности” / Гл. ред. М.В. Ковальчук. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2015.
5. Булаков Е.В., Калугин А.К. Научный руководитель промышленных реакторов // А.П. Александров. Документы и воспоминания. М.: ИздАТ, 2013. С. 151–157.
6. Хлопкин Н.С. Проблемы создания морской атомной энергетике // Роль российской науки в создании отечественного подводного флота. М.: Наука, 2008.
7. Пологих Б.Г., Хлопкин Н.С. Создание первой атомной энергетической установки для ледокола // Николай Сидорович Хлопкин. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2016.
8. Игорь Васильевич Курчатов в воспоминаниях и документах. М.: ИздАТ, 2004.
9. Александров А.П. Документы и воспоминания. К 100-летию со дня рождения / Отв. ред. акад. Н.С. Хлопкин. М.: ИздАТ, 2003.
10. Александров А.П. Собрание научных трудов. В 5 т. Т. 3. Атомный флот. М.: Наука, 2006.
11. Александров А.П. Собрание научных трудов. В 5 т. Т. 4. Атомная энергетика. М.: Наука, 2015.
12. Сидоренко В.А. Водо-водяные энергетические реакторы. Начало и результат. М.: НТЦ ЯРБ, 2018.
13. Александров А.П. Генеральный адрес участникам VII конгресса Мировой энергетической конференции // Атомная энергия. 1968. № 5. С. 356–362.
14. Черноплёков Н.А. Из тех, кто определил лицо эпохи // Вестник РАН. 2003. № 2. С. 148–169.
15. Усыкин А.К. Военное кораблестроение и атомная энергия. Записки и размышления / Под ред. вице-адмирала Р.Д. Филоновича. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, 1996.
16. И.В. Курчатов и А.П. Александров о стратегии ядерного энергетического развития / Отв. ред. А.Ю. Гагаринский. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2013.
17. Физики о себе / Отв. ред. В.Я. Френкель. Л.: Наука, 1990.

---

---

РАЗМЫШЛЕНИЯ НАД НОВОЙ КНИГОЙ

---

---

## ЯДРО ПОТЕНЦИАЛА СИБИРСКОЙ НАУКИ

© 2023 г. О. Н. Шелегина<sup>а,\*</sup>, Г. М. Запорожченко<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт истории СО РАН, Новосибирск, Россия

\*E-mail: [oshelegina@yandex.ru](mailto:oshelegina@yandex.ru)

\*\*E-mail: [galinakoop@yandex.ru](mailto:galinakoop@yandex.ru)

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

В статье предпринята попытка историко-культурного анализа двухтомника “Российская академия наук. Сибирское отделение. Персональный состав”. Высказывается мнение об актуальности и перспективности выпуска научно-справочных изданий, представляющих действительных членов и членов-корреспондентов Российской академии наук. Показано, что присвоение сибирским учёным высших академических званий базируется на традициях Российской академии наук, научно-организационных принципах СО РАН, личных качествах научных лидеров, достижениях возглавляемых ими исследовательских коллективов.

**Ключевые слова:** Российская академия наук, Сибирское отделение РАН, “Российская академия наук. Сибирское отделение. Персональный состав”, фундаментальная наука, научное наследие, популяризация науки, инновационный проект “Академгородок 2.0”.

**DOI:** 10.31857/S0869587323070083, **EDN:** URWJTK

На рубеже XX–XXI вв. заметно активизировалась научная рефлексия по переосмыслению ценностно-смысловых, гуманистических и этических оснований науки, её прагматического статуса в современном обществе и культуре [1, с. 5, 6]. Рассмотрение науки как социального института, создающего наивысшие интеллектуальные ценности, актуализирует изучение мира научной элиты [2, с. 178]. К числу важных событий в этом исследовательском пространстве можно отнести выход в свет двухтомника “Российская академия наук. Сибирское отделение. Персональный состав”<sup>1</sup>. Издание приурочено к 65-летию создания Сибирского отделения РАН, 300-летне-

му юбилею Российской академии наук и было инициировано президиумом СО РАН во главе с председателем регионального отделения академиком РАН В.Н. Пармоном, а подготовлено при деятельном участии академика РАН Д.М. Марковича.

Сибирское отделение ранее уже дважды публиковало справочные данные об учёных, избранных в его состав. Первое издание было выпущено в 1982 г. к 25-летию СО АН СССР, второе – в 2007 г. к 50-летию СО РАН. Издание 2022 г. отражает ситуацию, связанную с реорганизацией структуры Российской академии наук. Как известно, в соответствии с Федеральным законом № 253-ФЗ от 27 сентября 2013 г. к РАН присоединились Российская академия медицинских наук (РАМН) и Российская академия сельскохозяйственных наук (РАСХН), а их действительные члены и члены-корреспонденты получили соответствующий статус.

Новое издание структурно состоит из двух томов. В первом помещены биографические справки о действительных членах Сибирского отделения, избранных за весь период его существования, в том числе, учёных, вошедших в состав отраслевых академий в регионе, начиная с 1970 г. Второй том содержит биографические справки о

<sup>1</sup> Российская академия наук. Сибирское отделение. Персональный состав. В 2 т. / Сост. Н.Н. Аблажей, С.А. Крайних, Н.А. Куперштох [и др.]; отв. ред. В.Н. Пармон. 2 изд., перераб. и доп. Новосибирск: СО РАН, 2022. Т. 1. Действительные члены; Т. 2. Члены-корреспонденты.

ШЕЛЕГИНА Ольга Николаевна — доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник сектора общественно-политического развития ИИ СО РАН. ЗАПОРОЖЧЕНКО Галина Михайловна — доктор исторических наук, старший научный сотрудник сектора истории общественно-политического развития ИИ СО РАН.

членах-корреспондентах отделения, включая избранных на вакансии членов-корреспондентов в отраслевых академиях в регионе с 1970 г.

При рассмотрении двухтомника, в котором представлено 536 биограмм членов Российской академии наук, складывается представление о персональном составе СО РАН как своеобразной вершине айсберга сибирской науки, формирование которого имеет длительную историю, связанную с развитием российской науки. Научный потенциал, сложившийся в региональных отделениях РАН, прежде всего в Сибирском, стал базисом для реализации приоритетных направлений государственной политики в сфере науки и образования.

Ретроспективный взгляд возвращает нас к 1960-м годам, когда существенно возросло понимание роли научно-технического прогресса, а наука стала одной из идеологем и фундаментальных опор стратегии развития советского общества. Создание в 1957 г. Сибирского отделения АН СССР даже при том, что далеко не всем планам было суждено осуществиться, стало несомненным успехом [3, с. 142, 143]. Формирование новой научной базы радикально изменило ориентацию научных исследований в регионе – в Сибирь пришла настоящая большая наука, начались масштабные фундаментальные исследования по широкому спектру научных дисциплин. “Курс на регион” сохранился и усилился, но появилось то, чего не было в Сибири раньше – классическая математика, “большая физика”, исследования в области химии и химических технологий, опальная тогда генетика и информационные науки, социология [4, с. 7].

Принципиально важно, что в инициативе академиков М.А. Лаврентьева, С.А. Христиановича, С.Л. Соболева (т. 1, с. 280, 281, 512, 513, 452, 453) точкой отсчёта при создании нового научного центра стала вся страна. Предполагалось сформировать комплекс научных учреждений, который должен был способствовать ускоренному развитию производительных сил восточных регионов и обеспечивать существенный прирост кадрового потенциала высшей квалификации для всей отечественной науки. Такая постановка вопроса радикально отличала новую концепцию от других проектов [4, с. 127].

Решающее значение в конце 1950-х годов для перспектив организации нового научного центра имело выделение специальных “сибирских” вакансий при проведении выборов в состав Академии наук СССР, состоявшихся 27–28 марта 1958 г. В список кандидатур вносились фамилии лишь тех учёных, кто либо уже работал в научных учреждениях Сибири и Дальнего Востока, либо изъявил желание переехать в восточные регионы страны. Всего было избрано 8 действительных

членов Академии наук и 27 членов-корреспондентов, причём не все вакансии были заполнены, что доказывает высокий уровень требований к кандидатам [4, с. 151, 152]. В числе избранных – академики И.Н. Векуа, П.Я. Кочина (Полубаринова), В.Д. Кузнецов, А.И. Мальцев, Ю.Н. Работнов, В.С. Соболев, А.А. Трофимук, А.Л. Яншин; очерки о них представлены в рассматриваемой работе (т. 1, с. 86, 87, 248, 249, 262, 263, 308, 309, 402, 403, 448, 449, 492, 493). Всего после первых выборов в Сибирском отделении работало 39 членов Академии наук (11 академиков и 28 членов-корреспондентов, что составило 8% общей численности академии. До создания отделения на всю территорию Сибири и Дальнего Востока имелся лишь один член-корреспондент Академии наук – физик В.Д. Кузнецов (т. 1, с. 262, 263), работавший в Томске, а в период существования Западно-Сибирского филиала АН СССР в Сибири непродолжительное время трудились академики А.А. Скочинский и С.А. Чаплыгин.

К концу 1960-х годов в состав академического корпуса СО АН СССР входили 43 человека (80% из них в Новосибирске, по 10% в Иркутске и Дальневосточном регионе) [4, с. 154]. Почти половина – выходцы из НИИ и вузов Москвы и Ленинграда, 9% – из других городов европейской части страны, 42% – из институтов и вузов Сибири и Дальнего Востока [4, с. 157]. Когорту блестящих учёных, решивших переехать на работу в Сибирь, метко называли “научным десантом”. Коллективы новых институтов, формировавшихся научными лидерами, выкристаллизовывались из академических учреждений, действовавших в основном в центре страны. За каждым приехавшим в Новосибирск, а затем и другие центры отделения, стоял опыт и традиции ведущих российских и мировых научных школ, что нашло отражение в ряде биограмм, в том числе М.А. Лаврентьева, Г.К. Берескова, Г.И. Будкера (т. 1, с. 280, 281, 60, 61, 70, 71). Исключительность ведущих учёных Сибирского отделения неизменно выступала важнейшим фактором укрепления его позиций. Именно поэтому кадровая элита СО РАН закономерно оказывалась объектом пристального внимания учёных, историков, социологов [5].

Рецензируемый двухтомник подготовлен сотрудниками сектора истории социально-экономического развития Института истории СО РАН, постоянно обращающегося к вопросам истории сибирской науки, кадровой политики, проблемам социальной памяти в научной среде и социокультурного развития новосибирского Академгородка как достопримечательного места. В основу биограмм, с учётом апробированных ранее матриц, положен единый принцип, включающий информационные разделы, максимально полно отображающие основные сведения, касающиеся личной и научной биографии признанных деяте-

лей науки. Необходимо отметить, что при создании биосправок авторы руководствовались принципом историзма в отношении датировок и археографии. Так, даты рождения до 1 (13) февраля 1918 г. указаны по старому и новому стилю, место рождения — в соответствии с административно-территориальным делением страны в тот или иной период. Приведены названия губерний, прежние названия населённых пунктов и учебных заведений, что адекватно отражает реалии. Составители также учли, что государственные премии с середины 1930-х до середины 1950-х годов назывались Сталинскими, что сибирские отделения союзных академий наук до 1992 г. именовались СО АН СССР, СО АМН СССР, СО ВАСХНИЛ, а после 1992 г. — СО РАН, СО РАМН, СО РАСХН (т. 1, с. 10).

Динамика научного потенциала, ядром которого выступают учёные высшей квалификации (доктора и кандидаты наук), а среди них — видные учёные (действительные члены/академики и члены-корреспонденты), избираемые в ходе периодически проводимых выборов в состав Академии наук, представлена на основе репрезентативного массива статистических данных (т. 1, с. 5–9), что позволяет читателю представить масштабы, глубину и общественную значимость научно-организационных процессов по формированию академического корпуса в нашей стране.

Включение в Российскую академию наук существовавших ранее отраслевых академий существенно увеличило численность корпуса научной элиты. Общий состав членов РАН по Сибирскому отделению по состоянию на 2022 г., как явствует из нового издания, включал 273 академика и 263 члена-корреспондента.

В двухтомнике, отражающем общий персональный состав СО РАН в исторической динамике, сведения об учёных с их фотопортретами приводятся в алфавитном порядке. Каждую биограмму предваряет краткое резюме, включающее академический статус, учёную степень, учёное звание профессора (если оно есть) с годами присвоения, область науки и специализацию внутри неё. Затем следуют сведения биографического характера: время, место рождения (кончины в случае завершения жизненного пути), наименование вуза с указанием факультета, аспирантура (ординатура). Следующий раздел отражает трудовую (производственную, научную, педагогическую) деятельность с указанием должностей, мест и времени работы в том или ином учреждении/организации. Существенно дополняет эти сведения перечисление в конце статьи наиболее важных работ учёного.

Особо выделен период работы в Сибирском отделении Академии наук с указанием позиций в академической карьере. Например, академик

Н.Н. Покровский (1930–2013), всемирно известный специалист по истории России, археографии и источниковедению, работал в Сибирском отделении с 1965 г.: младший научный сотрудник Отдела гуманитарных исследований Института экономики и организации промышленного производства (1965–1966), младший (1966), старший научный сотрудник (1970), зав. сектором археографии и источниковедения Института истории, филологии и философии (1975), зам. директора Института истории СО РАН (1992–2003). С 2003 г. — советник РАН (т. 1, с. 386).

Специальные информационные блоки посвящены сведениям о научно-организационной деятельности учёного (членству в отечественных и зарубежных научных организациях, редколлегиях журналов и т.д.), присуждении научных и государственных премий и наград, включая ведомственное и общественное признание заслуг, увековечивании памяти ушедших из жизни (т. 1, с. 9).

Вполне очевидно, что в концентрированных персональных очерках, определяемых жанром рассматриваемых книг, невозможно было представить особенности траектории жизненной судьбы, увлечения учёных, их вклад в развитие социокультурного пространства новосибирского и других сибирских академических городков. Вместе с тем члены РАН, работавшие в Сибирском отделении, покоряли не только научные вершины. Так, академик И.Н. Мешков (т. 1, с. 332, 333), один из организаторов альпинистского клуба СО РАН “Вертикаль”, стал мастером спорта по альпинизму, удостоился звания “Снежного барса”, которое носили альпинисты, покорившие самые высокие вершины, расположенные на территории СССР. В альпинистском движении новосибирского Академгородка участвовал также академик А.Д. Александров (т. 1, с. 16, 17). Их пример привлекал в “школу мужества”, как называли альпинизм, большое число молодёжи, студентов Новосибирского государственного университета<sup>2</sup>. Академик С.В. Гольдин (т. 1, с. 128, 129) страстно увлекался фотографией, играл на мандолине и фортепиано, сочинял музыку, активно занимался спортом (лыжами, большим теннисом), писал стихи, увлекался живописью. В 2003 г. вышло второе издание его книги стихов с рисунками автора [6]. Увлечения, список которых неисчерпаем, способствовали академическим успехам учёных.

В целом благодаря научно-организационной и общественной деятельности, мировоззрению, системе ценностей лидеров науки, опиравшихся на лучшие мировые традиции, происходило формирование важных компонентов этоса научного сообщества в Сибири, таких как интеллигентность, толерантность, свобода дискуссий, демо-

<sup>2</sup> Фонд клуба “Вертикаль”. Открытый архив СО РАН. <http://odasib.ru/openarchive/Default.cshtml>

кратизм в общении, понимание важности науки и образования для современного общества, открытость к международному сотрудничеству [7, с. 118].

Практически в каждом очерке-биограмме присутствуют данные о преподавательской деятельности учёных и их вовлечённости в мировое исследовательское сообщество. Как отмечала академик Т.И. Заславская, “одной из особенностей Академгородка была его относительная либеральность и интенсивность отношений с зарубежными учёными. Международные контакты учёных СО АН были достаточно широки, и трудностей с выездом за рубеж было меньше, чем в других городах” [8, с. 547, 548]. Первым наиболее ярким международным научным событием стал советско-американский симпозиум по уравнениям с частными производными в новосибирском Академгородке в августе 1963 г., начиная с которого важная роль нового наукограда и всего Сибирского отделения в процессах циркуляции знаний и глобализации науки в период холодной войны непрерывно возрастала. Создание в Сибири научных школ, признанных мировым научным сообществом, позитивно отражалось на процессе подготовки кадров для науки. Значимость лидеров научных школ с мировым именем, например, по алгебре (академик А.И. Мальцев), математической логике и теории вычислимости (академик РАН Ю.Л. Ершов), математической экономике (лауреат Нобелевской премии академик Л.В. Канторович), физике плазмы и ускорителям (академик Г.И. Будкер), археологии Азии (академик А.П. Окладников) (т. 1, с. 308–309, 160–161, 200–201, 70–71, 372–373) и многих других, сопряжена с их не менее яркой и плодотворной, чем научная, преподавательской деятельностью. В Новосибирском государственном университете, изначально созданном на принципах интеграции образования и науки, где лекторами выступали ведущие учёные, ряд аудиторий носят их прославленные имена.

В перспективе для расширения контента научно-популяризационного направления, связанного с жизнью и деятельностью видных сибирских учёных, издания, подобные рассматриваемому, целесообразно снабжать приложениями, содержащими указания на историографические, электронные ресурсы, объекты историко-культурного и мемориального значения. В этой связи отметим, что с 2001 г. в Сибирском отделении РАН издаётся книжная серия “Наука Сибири в лицах”, насчитывающая уже более 40 томов. В их числе “Век Лаврентьева”, “Эпоха Коптюга”, “Юрий Николаевич Руденко. Воспоминания о жизни и деятельности”, “Леонид Витальевич Канторович: человек и учёный”, “Ваш А.Л. Яншин”, “Пелагея Яковлевна Полубаринова-Кочина” и др.

В соответствии с общепринятыми в российской и мировой практике нормами и традициями память о выдающихся учёных увековечивается в названиях научно-исследовательских и учебных учреждений, минералов, планет, исследовательских кораблей, улиц, учебных аудиторий вузов, именных премий и стипендий, установке памятников, мемориальных досок, памятных знаков. Изучение научного и историко-культурного наследия новосибирского Академгородка, в силу своей уникальности имеющего статус достопримечательного места, позволило установить, что именами лидеров сибирской академической науки, прежде всего членов РАН, названы 12 проспектов и улиц, 25 университетских аудиторий, 9 лесных тропинок между университетским кампусом и институтами (особенность социокультурного ландшафта Академгородка), в память об учёных установлено 6 памятников, 59 мемориальных досок, 14 институтов названы именами первых директоров [9].

Обратим внимание на то, что в настоящее время существенно возрастает актуальность изучения всех видов наследия как основы национальной исторической памяти. “Наследие и публичная память должны служить обществу, должны помогать решать современные проблемы и строить достойное будущее” [10, с. 10]. Базовыми институтами наследия в СО РАН служат архивы, библиотеки, мемориальные комнаты, сохраняющие и репрезентирующие кадровое ядро сибирской науки в широком социокультурном пространстве. Так, в 2006 г. в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН по инициативе директора академика А.Э. Конторовича (т. 1, с. 236, 237) создан объект музейного значения “Мемориальный музей и библиотека академика А.А. Трофимука” (его по праву называли “главным геологом Сибири”). Центральное место в экспозиции занимает доступная для исследователей уникальная личная библиотека учёного, содержащая около 1000 томов по всему спектру вопросов разведки и добычи минеральных ресурсов [11, с. 223–230]. Мемориальные комнаты/кабинеты есть практически в каждом институте Сибирского отделения. С учётом развития информационных технологий созданы персональные электронные архивы. Желющие расширить свои знания об учёных, имеющих академические звания, могут также обратиться в “Открытый архив СО РАН” – систему представления, накопления и систематизации научного наследия<sup>3</sup>.

Следует отметить неослабевающий в научном сообществе Сибири интерес к лидерам науки, основанный на благодарности предшественникам

<sup>3</sup> Открытый архив СО РАН. <http://odasib.ru/OpenArchive/> (дата обращения 01.04.2023).

за создание СО РАН, гражданскую позицию, школу профессионализма, моральное наставничество, харизму. Вследствие этого творчески развиваются формы трансляции их научного наследия в социокультурном пространстве поселений, особенно в новосибирском Академгородке, приоритетная идентичность которого как достопримечательного места связана с “большой” наукой. В дополнение к научным конференциям (крупнейшие научные форумы международного уровня: “Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике”, “Беляевские чтения” по генетике, “Ершовская конференция по информатике”, “Покровские чтения” по источниковедению и археографии и др.), фотовыставкам и презентациям книг внедряются современные социокультурные практики: юбилейные уличные выставки, тематическое оформление вагонов Новосибирского метрополитена и городских автобусов, создание комплексных электронных ресурсов, викторины в социальных сетях, шахматные турниры, приуроченные к юбилеям известных учёных СО РАН.

В новосибирском Академгородке ежегодно 19 ноября проводится “Михайлов день” в честь двух Михайлов — Ломоносова как родоначальника отечественной академической традиции и Лаврентьева как основателя СО АН СССР. Средствами кинодокументалистики продолжается исследование участия известных учёных в событиях эпохального значения. В снятом в 2020 г. к 120-летию академика М.А. Лаврентьева новом документальном фильме “Созидающий взрыв” впервые внимание акцентировалось на сложных обстоятельствах противостояния руководителей отделения и руководителей страны в вопросе сохранения в составе СО АН СССР Института цитологии и генетики и личном вкладе Лаврентьева, который с присущими ему смелостью и находчивостью сумел убедить в своей правоте Н.С. Хрущёва, победоносно завершив, наконец, потребовавшую немало личного мужества борьбу многих видных учёных из разных областей знания за генетику в период господства “лысенковщины”.

Во вновь создаваемых памятниках сибирским учёным наблюдается переход от строгих канонических форм к своеобразному интерактивному представлению образа. Так, в центре композиции открытого в 2012 г. памятника Д.К. Беляеву (т. 1, с. 44, 45) — “беседа” сидящего на скамейке академика с объектом его главного эксперимента — одомашненной лисой. Рядом в духе современной культуры — место для селфи и отдыха, где зимой студенты лепят снежных лисиц и собак. Такие объекты в новосибирском Академгородке дополняются проектом благоустройства городской среды — устанавливаются “умные лавочки” с высказываниями известных учёных: “Без науки Россия превратится в колонию (Г.И. Марчук)”, “Одна из

важнейших свобод — свобода утверждать правду! (Т.И. Заславская)”, “Научить людей ценить, уважать, любить духовное наследие веков — главное призвание археологии. А духовное богатство — это самое дорогое, что есть у человечества. (А.П. Окладников)” (т. 1, с. 312, 313, 174, 175, 372, 373) и др. [12, с. 71, 72].

В настоящее время (на начало 2023 г.) в Сибирском отделении РАН состоит 221 член Российской академии наук: 103 академика и 118 членов-корреспондентов РАН<sup>4</sup>. Оценивая перспективы передачи научных традиций от одного поколения другому, можно с очевидностью констатировать, что совокупность систематизированного в представляемом издании материала характеризует его как универсальный многоплановый источник для организации исследовательской и образовательно-воспитательной работы с молодёжью, популяризации отечественной науки и истории Российской академии наук, востребованный ресурс информационного обеспечения инновационного проекта “Академгородок 2.0”.

С учётом сегодняшней ситуации данное издание, несущее в себе немалый эвристический и образовательно-воспитательный потенциал, должно занять важное место в структуре исследований истории и перспектив развития Сибирского отделения Российской академии наук. Думаем, молодёжи будет интересно узнать о пути к достижению академических вершин учёными, избранными академиками в достаточно молодом возрасте: в 31 год С.Л. Соболев (т. 1, с. 452), в 35 лет С.А. Христианович (т. 1, с. 512) в 42 года А.Г. Аганбегян (т. 1, с. 14). Исторический контекст может быть использован для мотивации учащихся и студентов к самообразованию, научной деятельности, реализации творческого потенциала, достижению жизненного успеха, он применим и для совершенствования основ молодёжной политики, привлечения молодёжи к решению масштабных задач научно-технологического развития России.

Книги, посвящённые персональному составу СО РАН, позволяют расширить спектр знаний о позициях женщин-учёных в академическом сообществе нашей страны. В рассматриваемой работе их представлено 28, в том числе 10 действительных членов и 18 членов-корреспондентов, избранных в период с 1958 по 2022 г. В числе первых в состав Сибирского отделения АН как действительный его член вошла математик, механик, специалист в области гидродинамики П.Я. Кочина (Полубаринова) (1(13).05.1899–3.07.1999), профессор (1934), доктор физико-математических наук (1940), член-корреспондент (1946), действи-

<sup>4</sup> По данным официального сайта СО РАН: [https://www.sbras.ru/ru/corresponding\\_member](https://www.sbras.ru/ru/corresponding_member) (дата обращения 20.03.2023).

тельный член АН СССР (1958). За время работы в СО АН (1959–1970) в качестве заведующей отделом прикладной гидродинамики Института гидродинамики СО АН СССР, заведующей кафедрой теоретической механики Новосибирского государственного университета она стала Героем Социалистического Труда. А вот пример пути достижения вершин научной карьеры представительницами нового поколения. О.Л. Барбаращ (1961 г.р.) — доктор медицинских наук (1996), профессор, заведующая отделом мультифокального атеросклероза (2008–2011), директор НИИ комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний (г. Кемерово), член Европейского общества кардиологов, в 2018 г. удостоена премии им. А.Н. Климова. Избрана членом-корреспондентом РАН в 2016 г., действительным членом РАН в 2022 г. (т. 1, с. 40, 41).

Первые сибирские женщины-академики уже овеяны легендами, а понятие “академина”, ассоциирующееся не только с фундаментальной наукой, но и с феминностью, стало исследовательским концептом<sup>5</sup> и названием фестиваля женщин, занятых в науке, образовании, экономике. Впервые такой фестиваль был проведён в новосибирском Академгородке в 2012 г., титул “Почётной Академины” получила тогда О.Л. Лаврик, ныне действительный член РАН (т. 1, с. 284, 285). В настоящее время фестиваль-конкурс “Академина” превратился в резонансное социокультурное мероприятие регионального уровня. Союз женщин Новосибирской области, Новосибирское отделение Федерации женщин с университетским образованием, Министерство региональной политики, Министерство образования, науки и инновационной политики Новосибирской области, СО РАН, Совет ректоров вузов Новосибирской области объединяют свои усилия с целью повышения престижа женщин — учёных, педагогов, специалистов в сфере экономики.

В заключение подчеркнём, что выход в свет двухтомника “Российская академия наук. Сибирское отделение. Персональный состав” приобретает особую значимость в преддверии приближающегося 300-летнего юбилея Российской академии наук. Возрастает социокультурное значение научного наследия, активизируется научно-популярная деятельность. В формирующуюся систему российских научно-популярных туристических маршрутов может быть включено и достопримечательное место “Новосибирский Академгородок” [13].

<sup>5</sup> См.: Интервью на интернет-портале “Научная Россия”: Г.М. Запорожченко, О.Н. Шелегина. Женское измерение профессии учёного (январь 2019 г. <https://scientificrus-sia.ru/news/zhenskoe-izmerenie-professii-uchyonogo> (дата обращения 20.03.2023)).

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института истории СО РАН (проект 0261-2021-0004) “Человек, общество и власть в России XX — начала XXI в.: процессы и результаты взаимодействия”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Орешиников И.М., Шкерина Т.И.* Современная философия науки: предмет, круг проблем, концепции, гуманистический смысл и назначение // История и педагогика естествознания. 2019. № 2. С. 5–17.
2. *Карабущенко П.Л.* Научная элита в контексте её исторического развития // Вопросы элитологии: философия, культура, политика. Астрахань, 2019. С. 178–188.
3. *Водичев Е.Г.* Траектории экономических реформ: наука и научная политика в годы “хрущёвского десятилетия” // Уральский исторический вестник. 2021. № 4 (73). С. 135–144.
4. Российская академия наук. Сибирское отделение: Исторический очерк / Е.Г. Водичев, С.А. Красильников, В.А. Ламин и др. Новосибирск: Наука, 2007.
5. *Куперитох Н.А.* Кадры академической науки Сибири (середина 1950-х — 1960-е гг.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
6. “Был в поэзии — мудро точен, в геофизике — поэтичен” // Наука в Сибири. 2011. 3 февраля.
7. *Шелегина О.Н., Куперитох Н.А., Запорожченко Г.М., Покровский Н.Н.* Идентичность локальных научных сообществ: опыт формирования и трансляции (по материалам Новосибирского научного центра СО РАН) // Гуманитарные науки Сибири. 2016. № 3. С. 117–122.
8. *Заславская Т.И.* Избранное. Социальная экономика и экономическая социология. М.: Экономика, 2007. Т. 1.
9. *Куперитох Н., Крайнева И.* Их именами названы институты Новосибирского научного центра. Новосибирск: СО РАН, 2022.
10. *Шола Т.С.* Мнемософия. Эссе о науке публичной памяти / ИКОМ России; ГМЗ “Ростовский Кремль”. Ростов Великий, 2017.
11. Музеи СО РАН (Музеи научных центров и институтов Сибирского отделения Российской академии наук. Очерки формирования и развития.) / Отв. ред. В.А. Ламин, О.Н. Трубецва. Новосибирск, 2009.
12. *Запорожченко Г.М., Шелегина О.Н.* От “Золотой долины” к “кремниевой тайге”: векторы культурной памяти // Уральский исторический вестник. 2022. № 3 (76). С. 66–75.
13. *Покровский Н.Н., Запорожченко Г.М., Шелегина О.Н.* Достопримечательное место “Новосибирский Академгородок”: научное и культурно-историческое наследие. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018.

---

---

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ

---

---

## НАГРАДЫ И ПРЕМИИ

DOI: 10.31857/S0869587323070137, EDN: EGRIXD

### ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.А. БАЛАНДИНА 2022 ГОДА – А.Г. ДЕДОВУ И А.С. ЛОКТЕВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.А. Баландина 2022 года академику РАН Алексею Георгиевичу Дедову и доктору химических наук Алексею Сергеевичу Локтеву (Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН) за цикл работ “Разработка новых катализаторов процессов переработки возобновляемого и альтернативного сырья в компоненты топлив и полупродукты нефтехимии” (монография, 60 статей и 19 патентов).

Авторы провели многочисленные исследования с целью создания новых эффективных катализаторов и сформулировали научные основы технологии переработки природного газа в синтез-газ – ключевой полупродукт при получении продуктов нефтехимии и топлива для водородной энергетики из газового сырья. Для России, располагающей уникальными запасами природного га-

за, особенно важны поиск эффективных катализаторов для переработки газового сырья в продукты нефтехимии и расширение сырьевой базы нефтехимии за счёт масштабного вовлечения в каталитическую переработку газа. В то же время газовое сырьё в нашей стране используется преимущественно в виде топлива, а не в виде сырья для нефтехимии. Значительные объёмы попутного нефтяного газа сжигаются на факелах, что влечёт за собой экологические проблемы, решение которых – актуальная научная и народнохозяйственная задача.

Учёные поставили своей целью поиск стабильных селективных катализаторов и технологий получения синтез-газа кислородной и углекислотной конверсией метана, этилена окислительной конденсацией метана, а также олефинов C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub>, ароматических углеводородов и компонентов топлив из газового сырья и продуктов переработки растительного сырья. На основе полученных катализаторов А.Г. Дедов и А.С. Локтев разработали и согласовали с заказчиками технологические регламенты на проектирование пилотных установок ряда процессов. Выполнено математическое моделирование процесса окислительной конденсации метана, и в итоге предложена технологическая схема каталитической переработки метана в этилен.

### ПРЕМИЯ ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА 2022 ГОДА – А. ЗАБАНБАРК И Л.И. ЛОБКОВСКОМУ



Президиум РАН присудил премию им. И.М. Губкина 2022 года кандидату геолого-минералогических наук Алие Забанбарк и академику РАН Леопольду Исаевичу Лобковскому (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН) за монографию “Геологическое строение и нефтегазоносность современных и древних континентальных окраин Атлантического океана”.

Работа представляет собой актуальное фундаментальное исследование по геологии нефти и га-

за. Авторы выявили ряд закономерностей, связанных с распределением запасов углеводородов в разрезе фанерозоя на континентальных окраинах Атлантического океана. Потенциал нефтегазоносности древних континентальных окраин связан с определённой стадией эволюции бассейнов. Эти закономерности связаны с глубоководными регионами, склонами и подножиями. Гигантские скопления углеводородов в последние

годы были открыты исключительно в глубоководных частях континентальных окраин.

Представленные в монографии теоретические оценки нефтегазоносности с использованием специализированной ГИС-технологии имеют важное практическое значение: такой подход на ранней стадии поисково-разведочных работ позволяет существенно повысить рентабельность разведки и разработки месторождений углеводородов в акваториях Мирового океана.