

ISSN 2658-705X



ISSN 2658-705X

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

ЯНВАРЬ – МАРТ 1/2024

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА № 1 2024



ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

№ 1 ЯНВАРЬ – МАРТ 2024

Научный журнал
Основан в 2008 году
Выходит 4 раза в год
ISSN 2658-705X

Главный редактор

академик РАН *В.П. Матвеевко*

Редакционная коллегия

канд. экон. наук *А.Г. Андреев*

академик РАН *А.А. Барях*

д-р истор. наук *А.М. Белавин*

академик РАН *Н.В. Зайцева*

академик РАН *И.Б. Ившина*

академик РАН *А.А. Иноземцев*

д-р истор. наук *И.К. Кирьянов*

чл.-корр. РАН *Л.Ю. Левин*

чл.-корр. РАН *В.Ю. Мишланов*

канд. экон. наук *И.П. Огородов*

д-р физ.-мат. наук *А.И. Мизев*

чл.-корр. РАН *О.А. Плехов*

д-р техн. наук *И.А. Санфиоров*

чл.-корр. РАН *В.Н. Стрельников*

чл.-корр. РАН *М.И. Соколовский*

д-р физ.-мат. наук *А.А. Ташкинов*

чл.-корр. РАН *Е.Г. Фурман*

чл.-корр. РАН *О.В. Хлынова*

чл.-корр. РАН *А.В. Черных*

д-р мед. наук *С.В. Гейн*

чл.-корр. РАН *Т.В. Гаврилова*

Ответственный секретарь

канд. техн. наук *В.П. Приходченко*

Адрес редакции журнала:

614000, г. Пермь, ул. Ленина, 13А

тел.: (342) 212-43-75

e-mail: vestnik@permisc.ru

PERM FEDERAL RESEARCH CENTER JOURNAL

№ 1 JANUARY – MARCH 2024

Scientific journal
Published since 2008
Issued quarterly
ISSN 2658-705X

Editor-in-Chief

Academician *V.P. Matveenko*

Editorial Board

Cand. Sc. (Econ.) *A.G. Andreev*

Academician *A.A. Baryakh*

Dr. Sc. (Hist.) *A.M. Belavin*

Academician *N.V. Zaytseva*

Academician *I.B. Ivshina*

Academician *A.A. Inozemtsev*

Dr. Sc. (Hist.) *I.K. Kiryanov*

RAS corresponding member *L.Yu. Levin*

RAS corresponding member *V.Yu. Mishlanov*

Cand. Sc. (Econ.) *I.P. Ogorodov*

Dr. Sc. (Phys.&Math.) *A.I. Mizev*

RAS corresponding member *O.A. Plekhov*

Dr. Sc. (Tech.) *I.A. Sanfirov*

RAS corresponding member *V.N. Strelnikov*

RAS corresponding member *M.I. Sokolovskii*

Dr. Sc. (Phys.&Math.) *A.A. Tashkinov*

RAS corresponding member *Eu.G. Furman*

RAS corresponding member *O.V. Khlynova*

RAS corresponding member *A.V. Chernykh*

Dr. Sc. (Med.) *S.V. Gein*

RAS corresponding member *T.V. Gavrilova*

Executive Editor

Cand. Sc. (Tech.) *V.P. Prihodchenko*

Editorial office address:

13A, Lenin St., Perm, 614000, Russia

tel.: (342) 212-43-75

e-mail: vestnik@perm-sc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЯНВАРЬ – МАРТ 1/2024

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Цыганов И.В., Нестерова Л.Ю., Ткаченко А.Г.

Скольжение бактерий и функциональная активность полиаминов
в этом процессе 6

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Нефарадеевское магнитоэлектричество в контексте мезомеханики 15

Жданова И.Н., Морозков Н.А., Суханова Е.В.

Оценка эффективности фитодобавки из астрагала нутового
в составе концентратной части рациона сельскохозяйственной птицы 33

Авдеев Н.В.

Влияние 20-гидроксиэкдизона на медоносную пчелу
в условиях теплового стресса 41

ПОРТРЕТ УЧЕНОГО

Фрик П.Г., Хрипченко С.Ю.

Академик АН Латвии

Кирко Игорь Михайлович (16.04.1918–26.11.2007) 47

Шкляев Ю.В.

Владимир Сергеевич Шкляев – жизнь и гетероциклы (28.10.1917 – 10.07.2003) 56

Ширшев С.В., Бахметьев Б.А.

Николай Николаевич Кеворков – основатель иммунологии в Перми 60

ЭТЮДЫ О НАУКЕ

Бычков С.Г.

Геолого-геофизические исследования Владимира Марковича Новоселицкого 67

Ташкинов А.А., Чекалкин А.А.

Научное наследие профессора Ю.В. Соколкина 72

CONTENTS

JANUARY – MARCH 1/2024

RESEARCH: THEORY AND EXPERIMENT

- Tsyganov I.V., Nesterova L.Yu., Tkachenko A.G.*
Bacterial sliding and functioning of polyamines in this process 6
- Stolbov O.V., Raikher Yu.L.*
Non-faraday magnetoelectricity in the context of mesomechanics..... 15
- Zhdanova I.N., Morozkov N.A., Sukhanova E.V.*
Evaluation of the effectiveness of Astragalus chickpeas phytoadditives
as part of the diet for farmed poultry..... 33
- Avdeev N.V.*
Influence of 20-hydroxyecdysone on the honey bee under heat stress..... 41

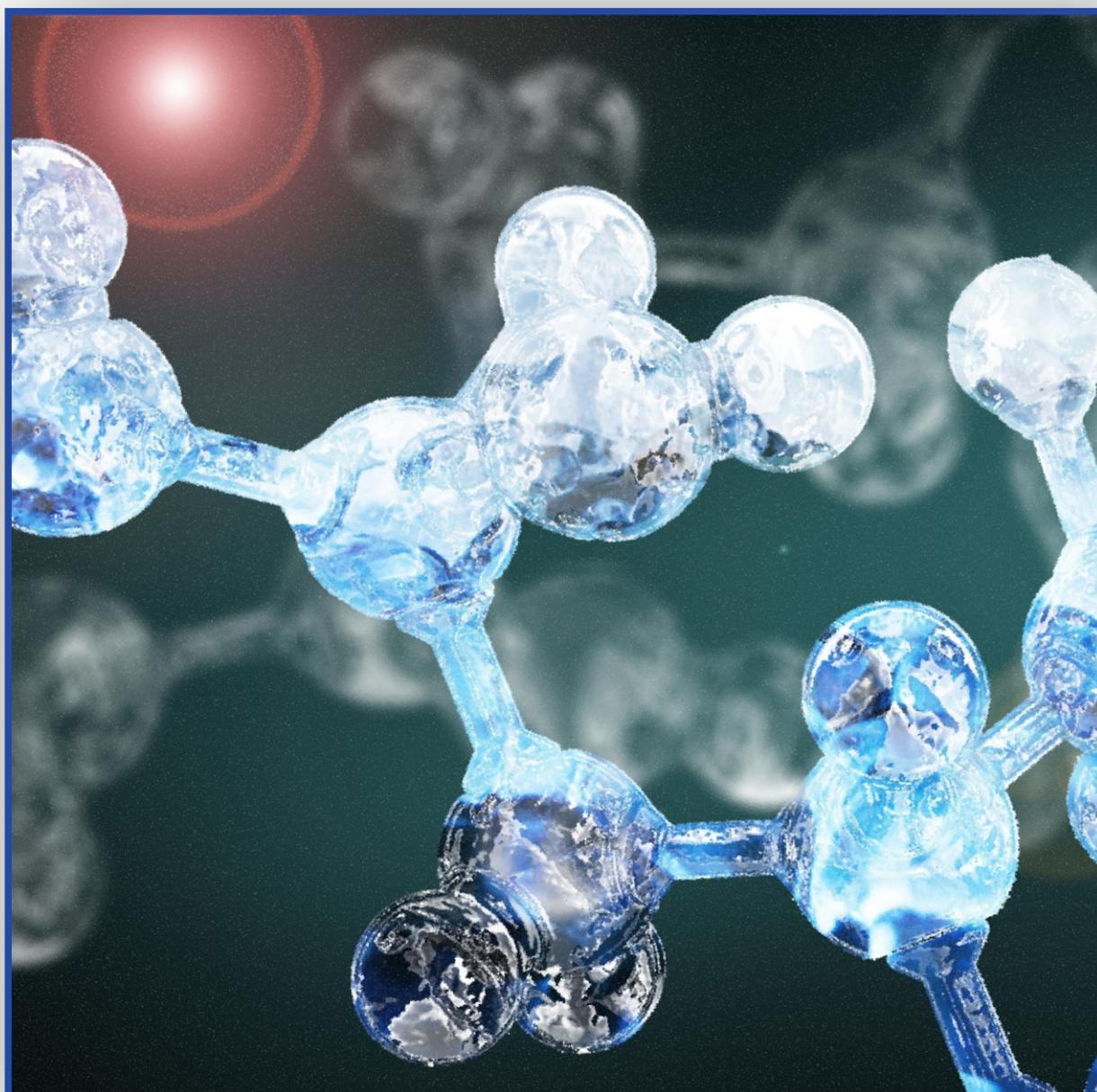
PORTRAIT OF THE SCIENTIST

- Frick P.G., Khripchenko S.Yu.*
Academician of the Academy of Sciences
of Latvia Igor Kirko (16.04.1918–26.11.2007)..... 47
- Shklyayev Yu.V.*
Vladimir Sergeevich Shklyayev – life and heterocycles (28.10.1917 – 10.07.2003)..... 56
- Shirshov S.V., Bakhmetyev B.A.*
Nikolay Nikolaevich Kevorkov – founder of immunology in Perm..... 60

STUDIES ABOUT SCIENCE

- Bychkov S.G.*
Geological and geophysical research of Vladimir Markovitch Novoselitsky 67
- Tashkinov A.A., Chekalkin A.A.*
Scientific heritage of Yu.V. Sokolkin 72
-

**ИССЛЕДОВАНИЯ:
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ**



СКОЛЬЖЕНИЕ БАКТЕРИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЛИАМИНОВ В ЭТОМ ПРОЦЕССЕ *

И.В. Цыганов, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

Л.Ю. Нестерова, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

А.Г. Ткаченко, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

Для цитирования:

Цыганов И.В., Нестерова Л.Ю., Ткаченко А.Г. Скольжение бактерий и функциональная активность полиаминов в этом процессе // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 6–14. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.1>

Для перемещения в окружающей среде и эффективной колонизации субстратов, бактерии в ходе эволюции приобрели разнообразные механизмы транслокации. Среди них скольжение является единственным способом перемещения, который доступен бактериям, не имеющим специальных органелл – жгутиков и пилей. Такое движение генерируется благодаря экспансивной (толкающей) силе, возникающей во время деления бактериальных клеток. Способностью к скольжению обладают различные виды бактерий, включая микобактерии, в том числе патогенные. Из всех способов перемещения микроорганизмов в пространстве скольжение является наименее изученным. Данная работа посвящена рассмотрению особенностей бактериального скольжения и оценке функциональной активности в этом процессе полиаминов, нормальных продуктов обмена, присутствующих в клетках большинства живых организмов.

Ключевые слова: скольжение, микобактерии, полиамины, гликопептидолипиды, подвижность бактерий.

Введение

Окружающая среда является источником энергии и питания для всех видов организмов, включая бактерии. Поэтому возможность перемещения в пространстве, и, как следствие, быстрая колонизация субстратов является значительным конкурентным преимуществом в межвидовой борьбе. Исходя из этого, не удивительно, что в ходе эволюции у бактерий сформировались органеллы, обеспечивающие им способность к направленному движению,

а некоторые их виды приобрели способность координировать свои действия для максимизации скорости движения на уровне колоний. Способность к транслокации может быть реализована также для видов, лишенных органелл движения, однако обладающих специфическими механизмами перемещения в пространстве. Одним из таких способов является скольжение (sliding motility), реализуемое посредством пассивного перемещения бактерий, благодаря действию экспансивной

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (124020500028-4)

силы, возникающей во время их деления и давления друг на друга. Другим важным фактором скольжения является изменение свойств клеточной поверхности, способствующее снижению силы трения между клетками и средой [1-3]. Несмотря на то, что скольжение впервые было описано более 50 лет назад [1], оно остается наименее изученным способом перемещения бактерий. Недостаток исследований сказывается уже на этапе идентификации данного типа движения у бактерий. Например, непатогенный *Mycobacterium smegmatis* долгое время считался неподвижным видом, до тех пор, пока в 1999 г. не было установлено, что, благодаря особенностям клеточной стенки, он способен скользить по поверхностям полужидких сред [4]. Недавно стало известно, что скольжение свойственно многим видам микобактерий, в том числе патогенным [5]. Проблема исследования скольжения связана с трудностью его идентификации в тех случаях, когда один и тот же вид может использовать одновременно несколько типов движения на плотных средах. Например, *Pseudomonas aeruginosa* способен к роению при помощи жгутиков, а также к подтягиванию при участии пилей IV типа, а его мутант с делециями генов флагеллина и пиллина, не способный к этим видам движения, может перемещаться скольжением [6]. Учитывая это, важно знать различия, существующие между механизмами бактериальной транслокации, а также иметь представление о специфике скольжения в сравнении с другими механизмами подвижности.

В настоящее время, помимо скольжения, выделяют четыре типа движения бактерий: плавание (swimming), роение (swarming), подтягивание (twitching), и ползание (gliding). Для первых двух необходимо наличие жгутиков [7, с. 8], подтягивание возможно за счет пилей IV типа [9], а ползание, которое тоже иногда называют скольжением, также, возможно в отсутствие специализированных внешних органелл [10].

Плавание осуществляется в жидких средах за счет работы одного или нескольких жгутиков (рис. 1). Синхронное движение органелл по часовой или против часовой стрелки, а также время между чередованием этих режимов определяет направление и длительность движения (таксис) [8, с. 11]. Выбор направления осуществляется при помощи рецепторных белков, реагирующих на сигналы разной природы: химической (хемотаксис), световой (фототаксис), магнитного поля (магнитотаксис).

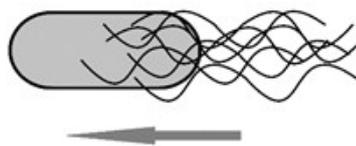


Рис. 1. Плавание бактерий

В основе роения также лежит работа жгутиков, но, в то же время, такой тип движения имеет ряд фундаментальных отличий. Роиться бактерии способны только на полужидких поверхностях и только коллективно, предварительно образовав «бактериальные плоты» [12]. Эти структуры способны перемещаться вне зависимости от внешних условий, не избегая неблагоприятных мест, а проходя сквозь них [13]. Объединение в плоты происходит с помощью сцепления жгутиками и сопровождается морфологическими изменениями: длина бактерий возрастает, появляются новые жгутики, что позволяет увеличивать скорость движения [12] (рис. 2).

Подтягивание реализуется бактериями не при помощи жгутиков, а благодаря пиллям IV типа. Данные органеллы короче и тоньше жгутиков. Пили, расположенные на дистальном конце тела бактерии, цепляются за субстрат, после чего происходит втя-

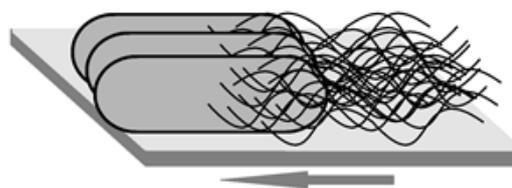


Рис. 2. Роение бактерий

гивание филаментов и резкий рывок [14] (рис. 3). Менее характерным, но возможным способом подтягивания является движение за счет толкания. Такой тип движения обнаружен у нитчатых цианобактерий [15], но он требует модификации органелл, поскольку обычные пилы для этого являются слишком тонкими и гибкими. Примечательно, что бактерии могут двигаться подтягиванием самостоятельно, но предпочитают совершать движения коллективно, используя для связи друг с другом латеральные пилы. Скорость движения при этом возрастает [16].

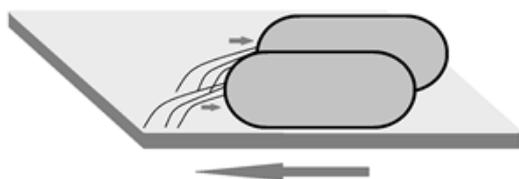


Рис. 3. Подтягивание бактерий

Ползание, как и скольжение, доступно безжгутиковым видам бактерий. В русскоязычной литературе оба типа движения зачастую переводят как «скольжение». Тем не менее, механизмы, лежащие в основе этих двух типов транслокации, заметно отличаются. Ползание, обнаруженное у миксобактерий, возможно, благодаря наличию протонных каналов в мембране, гомологичных статору у жгутика. Однако, поскольку миксобактерии являются безжгутиковыми микроорганизмами, протонные каналы могут перемещаться по липидной мембране. Большое количество каналов движется по спиральной траектории и заметно замедляется в тех участках, где бактерия соприкасается с поверхностью. Были обнаружены белки, которые связаны с каналами и в местах контакта бактерии с субстратом оказывают давление на клеточную стенку, заставляя клетку двигаться вперед и вращаться вокруг своей оси [17] (рис. 4).

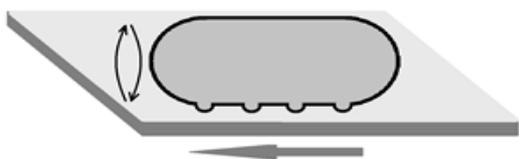


Рис. 4. Ползание бактерий

Механизм скольжения (sliding) кардинально отличается от описанных типов бактериальной транслокации. Сила, толкающая скользящие бактерии, возникает не из-за выполненной работы органелл, а генерируется пассивно во время деления бактерий в составе колонии [13]. Поэтому скольжение является единственным пассивным способом перемещения бактерий и термин «скольжение» корректно соотносить с английским словом «sliding», поскольку скольжение возможно при ослаблении силы трения между объектами, а при ползании (gliding) сила трения крайне необходима для сцепления между клеточной поверхностью и средой. Все делящиеся клетки способны оказывать давление на окружающие объекты из-за увеличения собственных размеров, но скользящие бактерии способны эффективно использовать эту силу для распространения по увлажненным поверхностям. В результате этого, во время скольжения формируется монослой, в котором клетки продвигают друг друга (рис. 5). Наслоение клеток практически не происходит из-за низкой силы трения между клеточной поверхностью и средой. Это достигается благодаря особым свойствам клеточной оболочки или секреции активных веществ, облегчающих скольжение [3]. На этой основе скользящие бактерии подразделяют на 3 группы. К первой группе относят бактерии, которые для уменьшения трения выделяют во внешнюю среду различные сурфактанты. Сюда входят такие виды, как *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Serratia marcescens*, *Legionella pneumophila* и другие. Они секретируют липопептиды [18]. Во вторую группу включают виды, которым для скольжения необходимы одновременно несколько соединений.



Рис. 5. Скольжение бактерий

Как правило, это липиды и полисахариды. Представителями этой группы являются *Bacillus subtilis* и *Sinorhizobium meliloti*. При изучении *B. subtilis* было обнаружено, что данный вид способен к скольжению благодаря флагеллумину. Кроме того, дальнейшие исследования показали, что штаммы с нарушением синтеза экзополисахаридов теряют способность скользить [19, с. 20]. Третий тип скольжения не требует секреции поверхностно активных веществ. К нему относят такие виды, как *Salmonella enterica* serovar Typhimurium [21] и различные виды микобактерий [22]. Про скольжение *S. enterica* известно только то, что для перемещения клеткам необходимо наличие поверхностного белка PagM, а скольжение микобактерий связывают с наличием в клеточной стенке гликопептидолипидов (ГПЛ) (рис. 6).

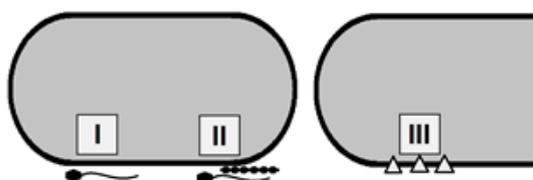


Рис. 6. Типы скольжения бактерий

В клеточной стенке наиболее известного представителя патогенных микобактерий – *Mycobacterium tuberculosis* – отсутствуют ГПЛ. Однако другие представители данного рода (нетуберкулезные микобактерии), в том числе способные вызывать заболевания, обладают способностью к скольжению за счет ГПЛ [5, с. 23].

Другим важным аспектом при изучении бактериального скольжения является исследование влияния внешних факторов на данный процесс, особенно соединений, характерных для тканей слизистых оболочек организма хозяина. Одним из таких факторов могут быть биогенные полиамины. Это алифатические углеводороды, имеющие в своем составе амино- и иминогруппы. Полиамины широко распространены в природе и синтезируются в клетках и тканях большинства организмов, выполняя регуляторную и сигналь-

ную функции у бактерий, участвуя в модуляции генной экспрессии и изменяя стабильность многих клеточных полимерных компонентов [24, с. 25]. Такие полиамины, как путресцин, кадаверин и в меньшей степени спермидин активно синтезируются многими бактериями и могут быть экспортированы в окружающую среду, в то время как клетки животных вырабатывают преимущественно спермин и спермидин. Некоторые бактерии, в первую очередь грамположительные, не продуцируют полиамины [26]. Однако эти соединения в значительных количествах присутствуют в органах и тканях эукариотических организмов и могут оказывать действие на клетки патогенных и сапрофитных микроорганизмов, развивающихся в теле хозяина [27]. Благодаря своей поликатионной природе, полиамины способны взаимодействовать с отрицательно заряженными структурами клеток, в том числе с компонентами клеточной стенки бактерий, что может оказывать влияние на свойства бактериальной оболочки, такие как способность к скольжению. Исходя из этого, целью настоящей работы является изучение влияния биогенных полиаминов на скольжение и свойства клеточной поверхности микобактерий.

Экспериментальный дизайн

В качестве объекта исследования использовали штамм *Mycobacterium smegmatis* mc² 155. Культуру, хранившуюся на чашках Петри с агаром Luria-Bertani (LB) (“Sigma”, США), высевали на пробирку с 5 мл жидкой среды Middlebrook 7H9 (“Difco”, Франция), содержащую глицерин, 50 мкг/мл ампициллина (“Applichem”, Германия) и 0,05% Tween 80 (“Panreac”, Испания). Культуры пересеивали в пробирку со свежей питательной средой с расчетом достижения конечной оптической плотности 0,02 (ОП₆₀₀) и после культивирования в термостатируемом шейкере (37°C, 200 об/мин) до заданной плотности использовали в качестве инокулята.

Скользящие колонии выращивали на полужидком агаре в пластиковых чашках Петри (40 мм). С этой целью в жидкую среду Middlebrook 7H9 добавляли агарозу (“Хеликон”, Россия) в концентрации 0,3%. Полиамины вносили в питательную среду, охлажденную до температуры 50°C, которую затем разливали по чашкам и подсушивали в течение 24 часов. Культуру *M. smegmatis* выращивали на питательной среде Middlebrook 7H9 до ОП₆₀₀ 0,2, наносили каплей (0,5 мкл) на поверхность агара в центре чашки Петри и культивировали в термостате при температуре 37°C в течение 24 часов.

Площадь скользящей колонии вычисляли с помощью программы Photoshop CC 2015.5 (“Adobe”, США). Для этого количество пикселей, занимаемых колонией на изображении, вычисляли с помощью указанной программы и далее пересчитывали в единицы площади (мм²) путем сравнения с количеством пикселей, приходящихся на диаметр чашки.

Монослой колонии наблюдали с помощью микроскопа МИКМЕД 6 (“ЛОМО”, Россия) при 400-кратном увеличении. Для наблюдения без окрашивания использовали конденсор фазового контраста. Монослой фотографировали на камеру микроскопа МС 6.3 (“ЛОМО”, Россия). Для сравнения плотности расположения клеток, фотографии загружали в программу Photoshop CC 2015.5, где максимально увеличивали контрастность изображения и сравнивали отношение черных пикселей (клетки на фото) к белым (фон).

Для анализа влияния полиаминов на количество ГПЛ в клеточных стенках микобактерий, бактериальные культуры выращивали до стационарной фазы, затем отмывали от питательной среды. Полученный клеточный осадок растворяли в смеси хлороформ:метанол (2:1) и подвергали действию ультразвука. После этого пробы повторно центрифугировали и отбирали супернатант, который смешивали с дистиллированной водой в пропорции 1:1. После перемешивания органическую фазу отбирали для ТСХ. Пробы выпари-

вали, растворяли в смеси хлороформ:метанол (9:1), наносили на пластины с силикагелем 60 (“Merk”, Германия) и разделяли с помощью тонкослойной хроматографии в системе хлороформ (4,5 мл) – метанол (0,5 мл). После прохождения фронта по всей пластине, ее высушивали и наносили 10 % раствор серной кислоты в этаноле и выдерживали в течение 90 секунд при температуре 180°C для обугливания.

Обработку результатов проводили с использованием пакета стандартных программ Statistica 6.0 (“StatSoft, Inc.”). Критерии оценки статистической значимости и вид представленных данных указаны в подписях к рисункам.

Результаты исследований

Присутствие в среде культивирования биогенных полиаминов приводило к ограничению скользящей подвижности клеток и, как следствие, к сокращению размеров скользящих колоний микобактерий. При этом статистически значимые изменения площади колоний вызывали только спермидин и спермин (рис. 7).

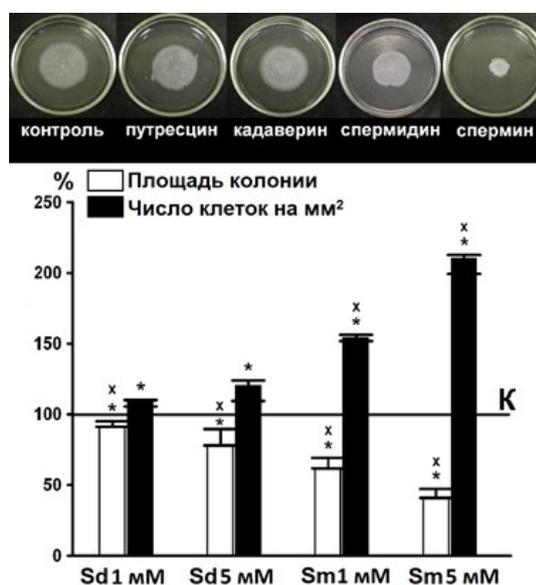


Рис. 7. Влияние биогенных полиаминов на скольжение микобактерий.
Sd – спермидин, Sm – спермин.

* – статистически значимое отличие от контроля; X – статистически значимое отличие от другой концентрации того же полиамина (критерий Манна-Уитни, $p \leq 0,05$)

Колонии, выросшие на среде с добавкой 5 мМ спермина, имели значительно меньший диаметр по сравнению с контрольными. При этом составляющие их клетки практически не распределялись по поверхности среды в виде монослоя, а располагались в несколько слоев, что характеризовалось увеличением количества клеток, приходящихся на единицу площади колонии (рис. 8). В то же время, уменьшение площади скользящей колонии под действием спермина и спермидина не было вызвано их бастериостатическим или бактерицидным эффектом, поскольку в данной концентрации, как было показано нами ранее, полиамины практически не влияют на скорость роста *M. smegmatis* [28].

Изучение микроструктуры скользящих колоний показало, что плотность клеток была обратно пропорциональна размеру колоний (см. рис. 8) и клетки в среде с добавкой спермина располагались более плотно, чем в контроле.

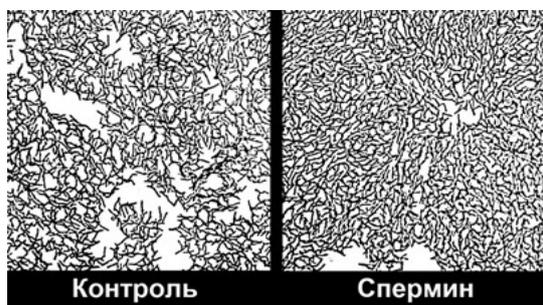


Рис. 8. Микрофотография монослоя скользящих колоний

Согласно принятой в настоящее время модели скользящего движения, гликопептидолипиды внешних слоев клеточной оболочки, благодаря их ацильным концам, создают гидрофобную среду на поверхности клеток, которая уменьшает трение о гидрофильную поверхность среды. Учитывая способность полиаминов влиять на экспрессию бактериальных генов, можно предположить, что спермидин и спермин оказывают влияние на скольжение, регулируя количество ГПЛ в клеточной стенке микобактерий. При сравнительном анализе профилей ГПЛ, полученных методом тонкослойной хро-

матографии, показано, что присутствие в среде спермидина и спермина не вызвало изменения количества ГПЛ в клетках *M. smegmatis* (рис. 9).

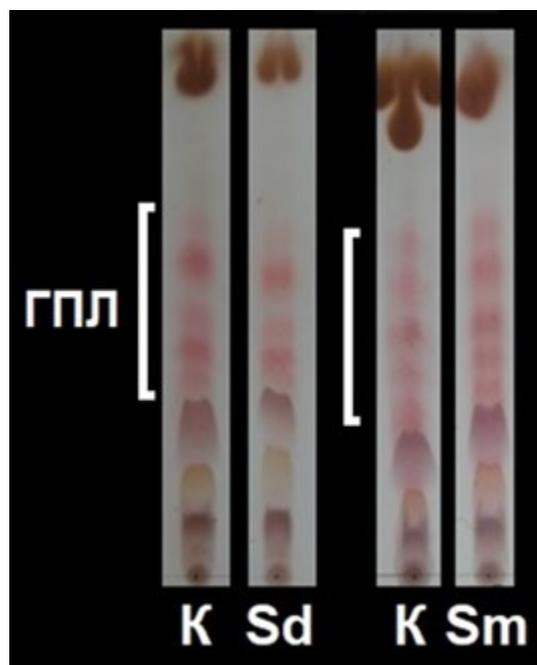


Рис. 9. Влияние спермидина (Sd) и спермина (Sm) на количество GPL микобактерий

Одним из возможных механизмов влияния полиаминов на скольжение может быть изменение степени гидрофобности клеточной поверхности за счет взаимодействия с уже присутствующими в клеточной стенке ГПЛ. Однако значимых изменений показателя, характеризующего гидрофобность/гидрофильность клеточной поверхности *M. smegmatis*, в присутствии полиаминов обнаружить не удалось (табл.). В то же время под действием биогенных полиаминов значительно изменялся заряд клеточной поверхности. Об изменении этого показателя свидетельствовало снижение отрицательных значений электрокинетического потенциала (дзета-потенциала) клеток. Наиболее выраженное изменение этого параметра наблюдалось в присутствии спермина. При этом величина эффекта зависела от времени экспозиции клеток в среде, содержащей полиамины (см. табл.).

Таким образом, складывается впечатление, что присутствие в клеточном окружении биогенных полиаминов, в первую

Влияние полиаминов на дзета-потенциал и гидрофобность поверхности микобактерий

	Дзета-потенциал (mV)		Степень гидрофобности (%)
	30 мин	180 мин	
Контроль	-24,80 (22,60; 25,70)	-28,30 (24,40; 28,75)	81,59 (77,95; 85,25)
Спермидин	-15,15 (13,10; 16,60)*	-8,99 (8,24; 9,45)*x	84,65 (80,98; 88,53)
Спермин	-10,95 (8,50; 13,50)*	-6,05(5,52; 6,52)*x	84,58 (79,59; 89,59)
Представление данных – среднее значение (минимальное; максимальное). * – статистически значимое отличие от контроля; x – статистически значимое отличие от варианта с экспозицией 30 мин (критерий Манна-Уитни, (p≤0.05)).			

очередь спермидина и спермина, вызывает изменение свойств клеточной поверхности микобактерий, в частности ее заряда, что приводит к ограничению скольжения.

Однако, рассуждая о возможных механизмах влияния полиаминов на скольжение, нельзя полностью исключать эффект этих соединений на генную экспрессию. Известно, что у грамотрицательных микроорганизмов существует широкий, по-

стоянно пополняющийся спектр регулируемых полиаминами генов, объединенных в "полиаминовый модулон" [29]. В структуру полиаминового модулона входят также гены, оказывающие влияние на формирование биопленок, которое во многом определяется свойствами клеточной поверхности [30]. Не исключено, что подобный эффект имеет место и у микобактерий.

Библиографический список

1. *Henrichsen J.* Bacterial surface translocation: a survey and a classification // *Bacteriological Reviews.* – 1972. – Vol. 36. – № 4. – P. 478–503. <https://doi.org/10.1128/br.36.4.478-503.1972>.
2. *Daffé M., Draper P.* The envelope layers of mycobacteria with reference to their pathogenicity // *Advances in microbial physiology.* – 1997. – Vol. 39. – P. 131–203. [https://doi.org/10.1016/s0065-2911\(08\)60016-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2911(08)60016-8).
3. *Hölscher T., Kovács Á.T.* Sliding on the surface: bacterial spreading without an active motor // *Environmental Microbiology.* – 2017. – Vol. 19. – № 7. – P. 2537–2545. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13741>.
4. *Martínez A., Torello S., Kolter R.* Sliding motility in mycobacteria // *Journal of Bacteriology.* – 1999 – Vol. 181 – № 23. – P.7331–7338. <https://doi.org/10.1128/JB.181.23.7331-7338.1999>.
5. *Lai L.Y., Lin T.L., Chen Y.Y., Hsieh P.F., Wang J.T.* Role of the Mycobacterium marinum ESX-1 Secretion System in Sliding Motility and Biofilm Formation // *Frontiers in Microbiology.* – 2018 – Vol. 30. – № 9. – P. 1160. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01160>.
6. *Murray T.S., Kazmierczak B.I.* Pseudomonas aeruginosa exhibits sliding motility in the absence of type IV pili and flagella // *Journal of Bacteriology.* – 2008. – Vol. 190. – № 8. – P. 2700–2708. <https://doi.org/10.1128/JB.01620-07>.
7. *Manson M.D.* Bacterial motility and chemotaxis // *Advances in Microbial Physiology.* – 1992. – Vol. 33. – P. 277–346. [https://doi.org/10.1016/s0065-2911\(08\)60219-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2911(08)60219-2).
8. *Harshey R.M.* Bacterial motility on a surface: many ways to a common goal // *Annual Review of Microbiology.* – 2003. – № 57. – P. 249–273. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.57.030502.091014>.
9. *Turnbull L., Whitchurch C.B.* Motility assay: twitching motility // *Methods in Molecular Biology.* – 2014 – Vol. 1149 – P. 73–86. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0473-0_9.
10. *Balagam R., Litwin D.B., Czerwinski F., Sun M., Kaplan H.B., Shaevitz J.W., Igoshin O.A.* Myxococcus xanthus gliding motors are elastically coupled to the substrate as predicted by the focal adhesion model of gliding motility // *PLOS Computational Biology.* – 2014. – Vol. 10. – № 5. – P. e1003619. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003619>.

11. *Magariyama Y., Sugiyama S., Kudo S.* Bacterial swimming speed and rotation rate of bundled flagella // *FEMS Microbiology Letters*. – 2001. – Vol. 199. – № 1. – P. 125–129. [https://doi.org/ 10.1111/j.1574-6968.2001.tb10662.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10662.x).
12. *Verstraeten N., Braeken K., Debkumari B., Fauvart M., Fransaer J., Vermant J., Michiels J.* Living on a surface: swarming and biofilm formation // *Trends in Microbiology*. – 2008. – Vol. 16. – № 10. – P. 496–506. [https://doi.org/ 10.1016/j.tim.2008.07.004](https://doi.org/10.1016/j.tim.2008.07.004).
13. *Kearns D.B.* A field guide to bacterial swarming motility // *Nature Reviews Microbiology*. – 2010. – Vol. 8. – № 9. – P. 634–644. [https://doi.org/ 10.1038/nrmicro2405](https://doi.org/10.1038/nrmicro2405).
14. *Mattick J.S.* Type IV pili and twitching motility // *Annual Review of Microbiology*. – 2002. – Vol. 56. – P. 289–314. [https://doi.org/ 10.1146/annurev.micro.56.012302.160938](https://doi.org/10.1146/annurev.micro.56.012302.160938).
15. *Khayatan B., Meeks J.C., Risser D.D.* Evidence that a modified type IV pilus-like system powers gliding motility and polysaccharide secretion in filamentous cyanobacteria // *Molecular Microbiology*. – 2015. – T. 98. – № 6. – P. 1021–1036. [https://doi.org/ 10.1111/mmi.13205](https://doi.org/10.1111/mmi.13205).
16. *Wall D., Kaiser D.* Type IV pili and cell motility // *Molecular Microbiology*. – 1999. – Vol. 32. – № 1. – P. 1–10. [https://doi.org/ 10.1046/j.1365-2958.1999.01339.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1999.01339.x).
17. *Faure L.M., Fiche J.B., Espinosa L., Ducret A., Anantharaman V., Luciano J., Lhospice S., Islam S.T., Tréguier J., Sotes M., Kuru E., Van Nieuwenhze M.S., Brun Y.V., Théodoly O., Aravind L., Nollmann M., Mignot T.* The mechanism of force transmission at bacterial focal adhesion complexes // *Nature*. – 2016. – Vol. 539. – № 7630. – P. 530–535. [https://doi.org/ 10.1038/nature20121](https://doi.org/10.1038/nature20121).
18. *Nogales J., Vargas P., Farias G.A., Olmedilla A., Sanjuán J., Gallegos M.T.* FleQ coordinates flagellum-dependent and -independent motilities in *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000 // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2015. – Vol. 81. – № 21. – P. 7533–7545. [https://doi.org/ 10.1128/AEM.01798-15](https://doi.org/10.1128/AEM.01798-15).
19. *Grau R.R., de Oña P., Kunert M., Leñini C., Gallegos-Monterrosa R., Mhatre E., Vileta D., Donato V., Hölscher T., Boland W., Kuipers O.P., Kovács Á.T.* A Duo of Potassium-Responsive Histidine Kinases Govern the Multicellular Destiny of *Bacillus subtilis* // *mBio*. – 2015. – Vol. 6. – № 4. – P. e00581. [https://doi.org/ 10.1128/mBio.00581-15](https://doi.org/10.1128/mBio.00581-15).
20. *van Gestel J., Vlamakis H., Kolter R.* From cell differentiation to cell collectives: *Bacillus subtilis* uses division of labor to migrate // *PLOS Biology*. – 2015. – Vol. 13. – № 4. – P. e1002141. [https://doi.org/ 10.1371/journal.pbio.1002141](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002141).
21. *Park S.Y., Pontes M.H., Groisman E.A.* Flagella-independent surface motility in *Salmonella enterica* serovar Typhimurium // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2015. – Vol. 112. – № 6. – P. 1850–1855. [https://doi.org/ 10.1073/pnas.1422938112](https://doi.org/10.1073/pnas.1422938112).
22. *Recht J., Martínez A., Torello S., Kolter R.* Genetic analysis of sliding motility in *Mycobacterium smegmatis* // *Journal of Bacteriology*. – 2000. – Vol. 182. – № 15. – P. 4348–4351. [https://doi.org/ 10.1128/JB.182.15.4348-4351.2000](https://doi.org/10.1128/JB.182.15.4348-4351.2000).
23. *Strollo S.E., Adjemian J., Adjemian M.K., Prevots D.R.* The burden of pulmonary nontuberculous mycobacterial disease in the United States // *Annals of the American Thoracic Society*. – 2015. – Vol. 12. – № 10. – P. 1458–1464. [https://doi.org/ 10.1513/AnnalsATS.201503-173OC](https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201503-173OC).
24. *Nolan L.M., Cavaliere R., Turnbull L., Whitchurch C.B.* Extracellular ATP inhibits twitching motility-mediated biofilm expansion by *Pseudomonas aeruginosa* // *BMC Microbiology*. – 2015. – № 15. – P. 55. <https://doi.org/10.1186/s12866-015-0392-x>.
25. *Kurihara S., Suzuki H., Tsuboi Y., Benno Y.* Dependence of swarming in *Escherichia coli* K-12 on spermidine and the spermidine importer. *FEMS Microbiology Letters*. – 2009. – Vol. 294. – № 1. – P. 97–101. [https://doi.org/ 10.1111/j.1574-6968.2009.01552.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2009.01552.x).
26. *Zamakhaev M., Tsyganov I., Nesterova L., Akhova A., Grigorov A., Bespyatykh J., Azhikina T., Tkachenko A., Shumkov M.* Mycolicibacterium *smegmatis* possesses operational agmatinase but contains no detectable polyamines. *International journal of Mycobacteriology*. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 138–143. [https://doi.org/ 10.4103/ijmy.ijmy_48_20](https://doi.org/10.4103/ijmy.ijmy_48_20).
27. *Gugliucci A.* Polyamines as clinical laboratory tools // *Clinica Chimica Acta*. – 2004. – Vol. 344. – № 1–2. – P. 23–35. [https://doi.org/ 10.1016/j.cccn.2004.02.022](https://doi.org/10.1016/j.cccn.2004.02.022).
28. *Nesterova L.Yu., Tsyganov I.V., Tkachenko A.G.* Biogenic Polyamines Influence the Antibiotic Susceptibility and Cell-Surface Properties of *Mycobacterium smegmatis* // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2020. – Vol. 56. – № 4. – P. 387–394. [https://doi.org/ 10.1134/S0003683820040110](https://doi.org/10.1134/S0003683820040110).
29. *Igarashi K., Kashiwagi K.* Characterization of genes for polyamine modulon // *Methods in Molecular Biology*. – 2011. – Vol. 720. – P. 51.–65. [https://doi.org/ 10.1007/978-1-61779-034-8_3](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-034-8_3).

30. Sakamoto A., Terui Y., Yamamoto T., Kasahara T., Nakamura M., Tomitori H., Yamamoto K., Ishihama A., Michael A.J., Igarashi K., Kashiwagi K. Enhanced biofilm formation and/or cell viability by polyamines through stimulation of response regulators UvrY and CpxR in the two-component signal transducing systems, and ribosome recycling factor // The International Journal of Biochemistry & Cell Biology. – 2012 – Vol. 44. – № 11. – P. 1877–1886. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2012.07.010>.

BACTERIAL SLIDING AND FUNCTIONING OF POLYAMINES IN THIS PROCESS

Tsyganov I.V., Nesterova L.Yu., Tkachenko A.G.

Institute of ecology and genetics of microorganisms UB RAS

For citation:

Tsyganov I.V., Nesterova L.Yu., Tkachenko A.G. Bacterial sliding and functioning of polyamines in this process // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 1. – P. 6–14. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.1>

In the course of evolution, bacteria have acquired a variety of translocation mechanisms for movement in the environment and efficient colonization of substrates. Among them, sliding is the only mode of migration that is available to bacteria that do not have specialized organelles such as flagella and pili. Such translocation is generated due to the expansive (pushing) force arising during bacterial cell division. For various species of bacteria, including mycobacteria (many of which are pathogenic), sliding capacity is intrinsic. Of all the ways in which microorganisms move in space, sliding is the least studied. This work is devoted to the consideration of the peculiarities of bacterial sliding, as well as the evaluation of the functional activity of polyamines, that are normal metabolites for cells of most living organisms, in this process.

Keywords: sliding motility, mycobacteria, polyamines, glycopeptidolipids, bacterial motility.

Сведения об авторах

Цыганов Иван Вадимович, лаборант лаборатории адаптации микроорганизмов, Институт экологии и генетики микроорганизмов – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева, 13; e-mail: zamegagurrendan@gmail.com

Нестерова Лариса Юрьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории адаптации микроорганизмов, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: larisa.nesterova@bk.ru

Ткаченко Александр Георгиевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией адаптации микроорганизмов, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: agtkachenko@iegm.ru

Материал поступил в редакцию 29.02.2024 г.

НЕФАРАДЕЕВСКОЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСТВО В КОНТЕКСТЕ МЕЗОМЕХАНИКИ *

О.В. Столбов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН;
Балтийский федеральный университет им. И. Канта*

Ю.Л. Райхер, *Институт механики сплошных сред УрО РАН;
Балтийский федеральный университет им. И. Канта*

Для цитирования:

Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Нефарадеевское магнитоэлектричество в контексте мезомеханики // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 15–32.
<https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.2>

Представлены физические основы магнитоэлектрического преобразования, использующего пьезоэлектрический эффект. Весь класс материалов, способных к такому преобразованию, носит название «мультиферроики». Важную для современных технологий группу мультиферроиков составляют композиционные среды, в которых совмещены ферромагнитная (или ферримагнитная) и пьезоэлектрическая компоненты. Магнитное поле, воздействуя на ферромагнетик, через него создает внутренние механические напряжения, которые воспринимаются другой фазой композита и запускают в ней пьезоэлектрический эффект, то есть делает образец источником разности потенциалов. Если ферромагнитная фаза – это всегда твердое вещество, то пьезофаза может быть не только кристаллом, но и полимером, что существенно расширяет возможности применения таких преобразователей. Фундаментальный анализ показывает, что в полимерном композите частицы ферромагнетика под действием внешнего поля возбуждают пьезоэффект сразу по двум путям: через магнитострикцию (изменение формы частицы) и через механическое изменение положения частицы как целого. Хотя эти два способа, в принципе, независимы, в феррит-полимерном композите они всегда сосуществуют и при той или иной комбинации условий их совместное действие может либо повышать, либо понижать эффективность преобразования. Этот общий вывод проиллюстрирован результатами численного моделирования магнитоэлектрического эффекта в пленке композита, состав которого имитирует один из самых известных в настоящее время полимерных мультиферроиков: дисперсию частиц феррита кобальта в матрице из поливинилиденфторида (CFO-PVDF).

Ключевые слова: полимерные мультиферроики, магнитоэлектрическое преобразование, магнитострикция, пьезоэффект, полимерные пьезокompозитные пленки.

* Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 21-72-30032.

*Это есть Это.
То есть То.
Все либо то, либо не то.
Что не то и не это, то не это и не то.
Что то и это, то и себе Само.*

Д. Хармс.

Введение

Из трех слов заголовка два первых, определено, нуждаются в пояснениях. Закон электромагнитной индукции Фарадея лежит в основе всей электротехники: генерации, передачи и использования электрической энергии, то есть базовой платформы современной цивилизации. Этот закон изучают все, он – в программе всеобщей средней школы. Его совсем несложно запомнить: переменное магнитное поле порождает электродвижущую силу, а та заставляет двигаться электроны в проводниках, то есть создает электрический ток или ищет возможность его создать, если тому есть диэлектрические препятствия.

Гораздо меньше известно, что разность электрических потенциалов можно получить и с помощью постоянного (или инфракрасного) магнитного поля, то есть, «в обход» закона Фарадея. О таком – нефарадеевском – способе магнитной индукции электрического поля не рассказывают в школе: он бы просто не поместился в программу. Сомнительно, что о нем слышали и студенты университетских физфаков. Вероятная причина – в том, что путь к получению нефарадеевского электричества достаточно сложен: требуется запустить скоординированное взаимодействие двух фундаментальных физических эффектов. Наверное, поэтому не стоит удивляться, что способ преобразования магнитного поля в электрическое, о котором пойдет речь, был придуман сравнительно недавно – где-то в 70-х годах прошлого века [1, 2]. Между тем, каждый из упомянутых эффектов в отдельности известен в физике еще с XIX века.

Открытие первого из них – магнито-стрикции ферромагнетиков – связано с именем Джеймса Джоуля и датируется

1847 годом [3]. По определению, «Магнито-стрикция – это изменение формы и размеров тела при его намагничивании» [4]. Исчерпывающее объяснение появилось много позднее – для этого понадобилась квантовая теория твердого тела, и она выяснила, что есть несколько разных причин и видов магнито-стрикции в ферромагнетиках. Однако в приложениях главное место занимает именно то явление – линейная магнито-стрикция – которое описал Дж. Джоуль. Он обнаружил, что ферромагнитный кристалл в ответ на приложенное магнитное поле не только изменяет свое состояние намагниченности, но также и свою форму. Если влияние поля на намагниченность хорошо заметно и легко измеримо, то регистрация формоизменения требует точности, поскольку для большинства ферромагнетиков и ферритов относительная деформация образца $\lambda = \Delta l / l$ составляет порядка 10^{-5} или, выраженная в миллионных долях, ~ 10 ppm. Заметим, что столь малая величина не означает малости усилия, которое создает ферромагнитный образец, стремясь реализовать свое стремление к деформированию. В самом деле, при модуле Юнга $E_Y \sim 100$ ГПа стрикционное давление (или сдвиговое напряжение), развиваемые частицей ферромагнетика, составляет $E_Y \lambda \sim 1$ МПа. Это усилие можно существенно увеличить, если используются специально подобранные материалы. Так, среди ферритов чемпионом по величине коэффициента магнито-стрикции является феррит кобальта CoFe_2O_4 с $|\lambda| \sim 6 \cdot 10^{-4}$ (в массивном кристалле, согласно справочникам), а среди металлов и сплавов – терфенол-D ($\text{Tb}_{\approx 0.3}\text{Dy}_{\approx 0.7}\text{Fe}_2$) с $|\lambda| \sim 2 \cdot 10^{-3}$. Как следствие, приведенная выше оценка возрастает в 60–200 раз.

Рис.1 иллюстрирует формоизменение, вызванное стрикционным эффектом в сферической частице ферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось», когда внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно этой оси. В расчете учтено, что коэффициент магнитострикции, который в общем случае описывается тензором четвертого ранга [5], в рассматриваемой ситуации имеет всего три независимых компоненты. Для наглядности на рис. 1 смещения точек поверхности частицы увеличены в 10^3 раз.

Представлен расчет деформации частицы в полях от нулевого до сильного – порядка поля насыщения. Приложенное поле H направлено вдоль оси Ox , а ось магнитной анизотропии частицы при $H=0$ направлено вдоль Oz . Как видно, эволюция носит сложный характер. На начальном этапе стрикция создает, в основном, касательные деформации, но в сильных полях те уступают место осевым. Подчеркнем, что «косое» положение частицы не является ее поворотом как целого: это результат того, что величины смещений в разных точках поверхности различны.

Второй эффект, который используется для реализации нефарадеевского пути, это пьезоэлектричество. Он был открыт в 1880 году братьями Жаком и Пьером Кюри, обнаружившими, что при сдавливании/растяжении кристалла, на его противоположных гранях появляются электрические заряды противоположных знаков, то есть образец поляризуется [6]. В простейшей интерпретации, причина эффекта в том, что под влиянием внешнего воздействия центры совокупных положительного и отрицательного зарядов (учитываются все ионы и электроны в образце), прежде совпадавшие – что обеспечивало электронейтральность – расходятся, и образец, подобно электрическому диполю, становится источником электрического поля. В реальности, из-за того, что межатомные взаимодействия сильны, в большинстве веществ пьезоэлектрический эффект чрезвычайно слаб. Есть, однако, специфический класс кристаллов – они носят название сегнетоэлектриков (“ferroelectrics” в англоязычном физическом тезаурусе) – которые демонстрируют заметную электризацию в ответ на приложенное механиче-

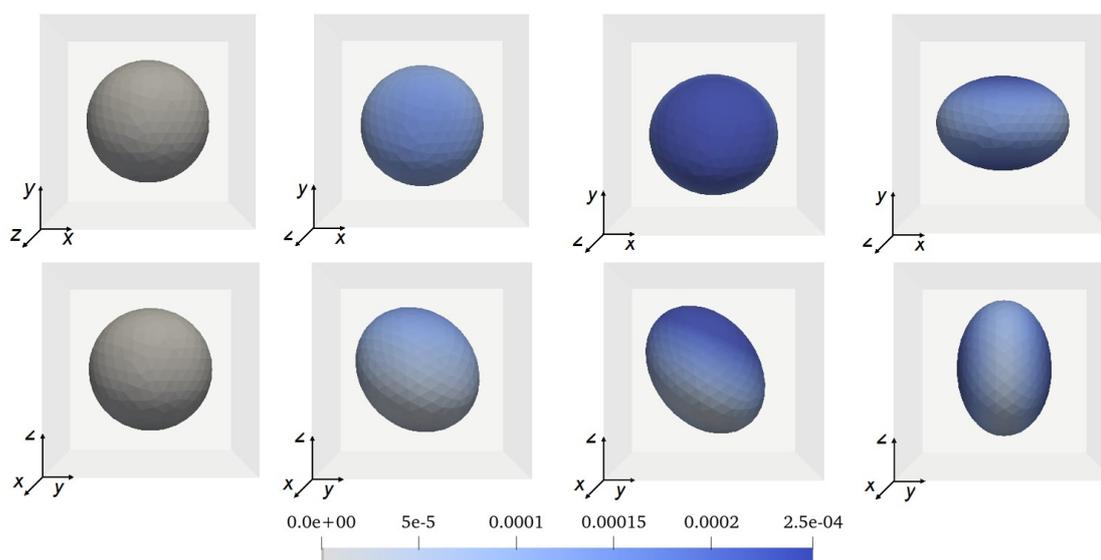


Рис. 1. Изменение формы сферической частицы при магнитострикционном эффекте, частица показана в двух проекциях – см. расположение осей координат. Внешнее поле направлено вдоль оси Ox , его значения (в условных единицах) суть: 0, 6, 13, 25; последнее соответствует состоянию намагниченности, а, значит, и магнитострикции, близкому к насыщению. Цветовая шкала (она общая для всех панелей) отображает величину относительного смещения точек поверхности без использования коэффициента усиления

ское напряжение умеренной величины. В этих кристаллических или частично кристаллических материалах состояние со смещенными центрами зарядов возникает пороговым образом при понижении температуры как термодинамически равновесное (новая фаза). Сравнение показывает, что с формальной точки зрения переход этих кристаллов в сегнетоэлектрическое состояние является весьма близким аналогом возникновения ферромагнетизма. В самом деле, вектор электрической поляризации выполняет здесь роль параметра порядка, температура перехода соответствует точке Кюри ферромагнетика, а возникающий фазовый переход относится ко II роду. Есть, конечно, и важные различия, по мере необходимости они будут упомянуты.

Обладая спонтанной поляризацией, сегнетоэлектрики гораздо «охотнее» поляризуются в ответ на механические напряжения, чем исходно неупорядоченные в электрическом отношении кристаллы. Из-за присущей любому кристаллу структурной анизотропии величина поляризационного отклика зависит от того, как приложено внешнее усилие относительно кристаллографических осей. Поэтому для того, чтобы охарактеризовать пьезосвойства кристалла необходим целый набор констант – пьезокоэффициентов. В теоретическом описании их сводят в некоторый тензор третьего ранга \hat{y} [5]. Сделаем важное замечание. Пьезокоэффициенты трудно рассчитать из первых принципов, они, как правило, находятся экспериментально. Однако ни в одной такой работе читатель не найдет измеренных значений компонент тензора \hat{y} . Дело в том, что в физике пьезо- и сегнетоэлектриков, особенно прикладной, принято использовать для той же цели матрицу размерности (3×6) , стандартно обозначаемую как d_{ik} , поскольку с двумерной таблицей удобнее работать, чем с трехмерной. Общность здесь не нарушается: элементы матрицы d_{ik} однозначно выражаются через компоненты тензора \hat{y} .

Укажем для справки характерные значения пьезомодулей лучших «классических» сегнетоэлектрических пьезоэлектриков – титаната бария (ВТО) и цирконат-титаната свинца (РЗТ). Для них $|d|$ составляют $\sim(1\div 4) \cdot 10^{-10}$ Кл/Н и $\sim(3\div 7) \cdot 10^{-10}$ Кл/Н соответственно; для поляризованных керамик (поликристаллов) этих веществ значения $|d|$ имеют тот же порядок.

При рекордно высоких значениях поляризуемости, классические кристаллы обладают высокой хрупкостью, что сильно ограничивает область их приложения. От этого недостатка свободны полимерные пьезоэлектрики. В принципе, эффект присущ любому соединению из дипольных молекул, но лишь немногие имеют сколь-нибудь заметные значения этих показателей. Наилучшими характеристиками обладают поливинилиденфторид (PVDF) и его сополимеры [7, 8]. Механизм пьезоэлектрического эффекта в PVDF иной по сравнению с неорганическими кристаллами, в нем участвуют только молекулы одного из изомеров, упакованные в квазикристаллические ламели – так называемая β -фаза – в ней молекулярные диполи выстроены параллельно друг другу. В остальных изомерах дипольные моменты хаотизированы, в результате чего скомпенсированы, и при полимеризации дают электрически инертную аморфную фазу. Поэтому при синтезе пленок главное внимание уделяется мерам, позволяющим обогатить образец β -фазой, для чего используются отжиг и вытяжка в постпроцессе [9].

Важнейшей процедурой, повышающей пьезоэлектрическую восприимчивость любого (неорганического или полимерного) материала, является полинг: помещение его в сильное статическое электрическое поле. Для кристаллов эта обработка близко напоминает намагничивание постоянных магнитов. Внешнее поле меняет структуру и ориентацию пьезоэлектрических доменов в образце. Таким образом, в результате полинга пьезоэлектрик приобретает одноосную макроскопическую анизотропию, характеризуемую матрицей пьезоэлектрической восприимчивости d_{ik} . В полимерах, где носителями дипольного момента являются моле-

кулярные кристаллиты (β -фаза), полинг способствует их ориентационному упорядочению и созданию структуры электретного типа. Это придает образцу и исходную поляризацию, и заметную пьезоэлектрическую восприимчивость.

Магнитоэлектрические композиты

После знакомства со свойствами магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов идея магнитоэлектрического (МЭ) преобразования, которое названо в заголовке нефарадеевским, становится очевидной. Такую функцию будет выполнять композит, где в максимально тесном соседстве находятся ферромагнитная (ФМ) и пьезоэлектрическая (ПЭ) компоненты. В приложенном магнитном поле стрикционный эффект стремится деформировать феррочастицы, но эта деформация встречает сопротивление окружения. В твердых композитах оно состоит из ПЭ частиц, скажем ВТО или PZT, а в полимерных – это β -фаза матрицы из PVDF. Попав под возникшие механические напряжения, пьезоэлектрик отвечает на них поляризацией. В композите это происходит локально, но вклады различных областей суммируются, и в результате между сторонами образца (удобно говорить о пленке) возникает разность электрических потенциалов $\Delta\phi$. В отличие от случая фарадеевской индукции, величину $\Delta\phi$ определяет вовсе не частота внешнего магнитного поля – оно может быть и квазистатическим – здесь важны материальные константы ФМ и ПЭ фаз и, не в меньшей степени, механика взаимодействия между ними.

Затрагивая механический аспект, отметим, что хотя оба способа выработки электричества – фарадеевский и нефарадеевский – для своей реализации нуждаются в решении задач механики, это очень разные задачи. Если на «фарадеевском» пути используется, в первую очередь, динамика вращательного движения (генераторы, электромоторы), то неотъемлемой составляющей «нефарадеевского» пути являются механика сплошных сред и механика композитов.

Ниже, в разделах 4–8 мы рассмотрим конкретный пример – магнитоэлектрический отклик модельной пленки из PVDF, куда внедрены частицы феррита кобальта (CFO). Однако прежде кратко очертим уже существующие и планируемые области приложения подобных материалов.

Перспективы применения полимерных магнитоэлектриков

С точки зрения мощности преобразования магнитной энергии в электрическую, полимерные мультиферроики, конечно, не могут конкурировать, например, с энергоконвертерами на крупногабаритных квантилеверах ламинатного типа (сплошной слой кристаллического сегнетоэлектрика в контакте с ферритом или метгласом), работающими в резонансном режиме, или с системами, приводящими в движение шаговые двигатели. Основная «ниша» полимерных мультиферроиков – миниатюрная слаботочная электроника, и там они чрезвычайно востребованы. Не имея возможности перечислить все открытые и открывающиеся возможности, укажем, во-первых, несколько полезных обзорных статей последнего времени [10–13] и, во-вторых, опишем некоторые интересные примеры прикладного использования полимерных магнитоэлектриков.

Создание разнообразных датчиков (поля, тока, усилия и т.д.) – вполне очевидная, хотя технически совсем не простая область [14, 15], поскольку там полимерным МЭ материалам приходится конкурировать с системами, основанными на иных физических принципах. Но есть пограничные с биофизикой и медициной области, для которой МЭ композиты уникальны, так как способны служить миниатюрными дистанционно управляемыми генераторами слабых низкочастотных электрических полей и механических вибраций.

Так, благодаря полимерным магнитоэлектрикам в восстановительной медицине появилась и оформилась быстро развивающаяся сейчас концепция смарт-скаффолдов [16–18]. В базовом варианте термином скаффолд обозначают сильнопористые

стые матрицы (каркасы), сделанные из биосовместимого материала; они могут иметь любую размерность – быть волокнами, пленками, 3D объектами. Восстановительная процедура заключается в том, что скаффолд подходящего размера и конфигурации, вживляется на место дефекта и заселяется мультипотентными стволовыми клетками. Затем, эти клетки биохимически стимулируют с целью, сначала, размножения и распространения (пролиферации), а затем – дифференциации, то есть перехода в нужный фенотип, например в клетки костной ткани – остеобласты. В результате, плотно заселенный остеобластами скаффолд вырастает в свое окружение, физиологически корректно ликвидируя повреждение кости или хряща.

Скаффолды становятся смарт-конструкциями, когда они выполнены из МЭ композита, в котором магнитное поле способно бесконтактно создавать и поверхностную электрическую поляризацию, и внутренние механические вибрации. Как оказалось, эти воздействия заметно ускоряют первичную адгезию стволовых клеток, их пролиферацию, а, в дальнейшем, дифференциацию. При этом PVDF – один из лучших материалов для создания полимерной основы смарт-скаффолдов, поскольку обладает хорошей биосовместимостью.

На рис. 2, взятом из работы [16], показаны некоторые результаты представленных там тестов по выращиванию остео-

бластов на пленочных скаффолдах из МЭ композита. Слева схематически показаны стадии эволюции стволовых клеток на подложке (адгезия, пролиферация, дифференциация) с указанием их длительности внутри общего семидневного срока эксперимента. Диаграмма справа демонстрирует уровень активности щелочной фосфатазы (ALP activity), измеренный на идентичных препаратах, но инкубированных на каждой стадии развития клеток при разных уровнях напряженности (указана в эрстедах) однородного магнитного поля. ALP activity – индикатор количества остеобластов, то есть уже сформировавшихся клеток костной ткани.

Согласно результатам [16], МЭ стимулирование дает значительный положительный эффект на стадиях адгезии и пролиферации, однако не влияет на скорость дифференциации; поэтому для всех тестов, представленных на рис. 2, $H_3=0$.

В перспективе, применение МЭ композитов в тканевой инженерии имеет все шансы распространиться и на многие другие виды клеток: различные типы мускульной ткани, нейроны и пр. [19].

Способность МЭ материалов дистанционно воспринимать магнитное поле и преобразовывать его в электрические сигналы дает физиологам уникальную возможность создавать очаги электростимуляции, имплантируя миниатюрные преобразователи (~1 мм) глубоко в организм,

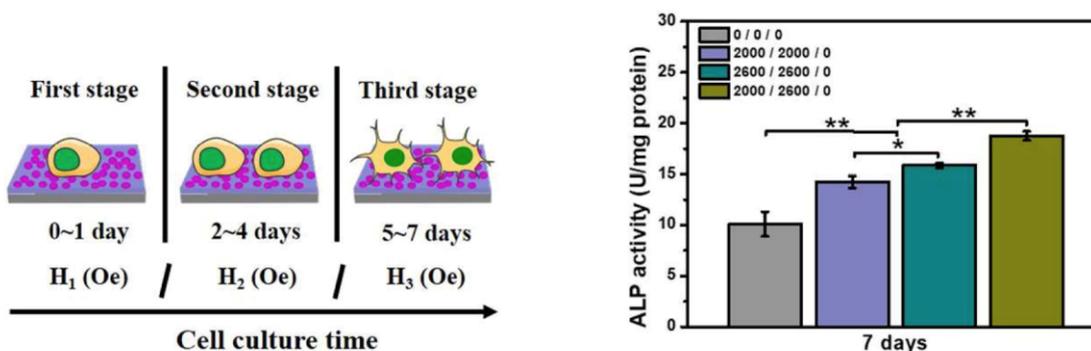


Рис. 2. Иллюстрация из работы [16]. Слева – схематическое представление стадий эволюции стволовых клеток на подложке из МЭ композита состава CFO-PVDF-TrFE.

Справа – относительное количество остеобластов в препаратах, подвергнутых обработке постоянным магнитным полем; на диаграмме указаны значения напряжённости поля на каждой из стадий клеточной эволюции, эти числа соответствуют обозначениям H_{1-3} на схеме слева

в том числе, в мозг [20]. Дистанционное программируемое возбуждение внутри организма электрических импульсов в «терапевтической» полосе частот (100–200 Гц) позволит стимулировать и корректировать мозговую деятельность и тем самым бороться с болезнью Паркинсона и другими дегенеративными поражениями головного мозга [21].

Математическое моделирование полимерных мультиферроиков

Безусловно, полимерные мультиферроики (МЭ композиты) интересны, прежде всего, своими многочисленными, порой уникальными приложениями, число которых непрерывно увеличивается. Однако для успешной инженерии в этой области необходимо иметь платформу базовых знаний, которая должна опираться одновременно на физику ферромагнетиков и ферритов, физику электрических кристаллов и полимеров и механику композиционных материалов. Кроме того, ввиду сложности этой междисциплинарной задачи для успешной работы над ней требуется на равных сочетать эксперимент и теорию.

Между тем, как часто случается с «горячими» темами, из-за чрезвычайно высокого интереса к приложениям изучение МЭ композитов двигалось преимущественно по эмпирическому пути. В результате, к настоящему времени эксперимент сильно опередил теорию. Таким способом удалось найти ряд полезных закономерностей, однако очень большой массив накопившихся данных остается без объяснения, как нет и цельного понимания всего спектра наблюдаемых явлений.

Что касается собственно теории магнитоэлектрических эффектов в полимерных композитах, то и здесь можно увидеть явную диспропорцию между возможными направлениями исследований. Континуальный подход, трактующий МЭ композит как гомогенную сплошную среду, наделенную восприимчивостью к внешнему магнитному полю, стрикционным коэффициентом и механически индуцируемой электрической поляризацией, развит и ос-

воен достаточно хорошо. Имеющиеся модели позволяют связать магнитомеханику этой среды с ее поляризацией, если только известен целый ряд констант, определяемых из эксперимента с конкретным материалом. Однако, как это свойственно любому континуальному приближению, объяснить происхождение указанных констант теория не может.

Ответы на подобные вопросы способен дать мезоскопический подход, где макроскопическое поведение композита выводится из анализа взаимодействий типа частица-частица и частица-матрица. Тем самым явно учитывается, что система является совокупностью многих элементарных объектов, существенно отличающихся по своим характеристикам. Именно такой взгляд дает возможность понять, как формируются наблюдаемые свойства изучаемой системы. В настоящее время мезоскопика полимерных МЭ – как всякая наука, имеющая дело с многочастичными взаимодействиями, она существенно опирается на компьютерное моделирование – только начинает развиваться [22]. Поиск результативных способов решения задач этого плана мы начали в работах [23, 24], используя на первых порах некоторые очень сильные упрощения.

Модельная пленка: сосуществование двух МЭ-эффектов различной природы

В работе [25] модель была существенно изменена для придания большего сходства с реальной системой. Ниже кратко представлены результаты решенной там задачи о магнитоэлектрических свойствах композитной пленки, материальные характеристики которой соответствуют дисперсии наночастиц феррита кобальта (CFO) в матрице поливинилиденфторида (PVDF). Сделанный выбор легко объяснить. Как уже было указано, господствующая парадигма считает единственным источником механического напряжения, запускающим МЭ преобразование, магнитострикцию – изменение размеров феррочастиц при намагничивании. Поскольку CFO по величине коэффициента магнитострикции λ далеко превосходит

другие коммерчески доступные ферриты, нано- или микрочастицы CFO используют в качестве магнитной фазы в подавляющем числе реальных композитов. От полимерной матрицы, куда внедряются частицы CFO, требуются, в первую очередь, высокая пьезочувствительность, а во-вторую – хорошая температурная стабильность. Число таких полимеров крайне невелико, и безусловными лидерами этого списка являются PVDF и его сополимеры.

Для приготовления композитной пленки магнитные частицы добавляют в раствор PVDF и тщательно диспергируют, например, ультразвуком. Затем смесь заливают в форму и отверждают, высушивая растворитель. Полученную пленку подвергают полингу и, возможно, деформированию. Это повышает содержание β -фазы, придает пленке остаточную поляризацию и устанавливает в ней направление оси диэлектрической анизотропии.

Приложение постоянного поля H_0 индуцирует – через описанную выше цепочку взаимодействий – появление поперечной (между сторонами пленки) разности потенциалов $\Delta\varphi$. Значение H_0 подбирается так, чтобы крутизна зависимости $\varepsilon(H_0)$, то есть производная $d\varepsilon/dH_0$, была максимальной; это состояние принимается за рабочую точку¹. Такой выбор гарантирует, что электрический отклик $\delta\varphi$ пленки на приложение пробного поля H будет наибольшим. При $H \ll H_0$ этот отклик всегда линеен по H , что позволяет описывать эффективность МЭ преобразования величиной «удельной магнитоэлектрической восприимчивости» $\alpha_M = \delta\varphi/(l \cdot H)$, где l – толщина пленки.

Казалось бы, источник появления $\Delta\varphi$ ясен – это магнитострикция частиц феррита. Однако последовательный анализ показывает, что стрикционный механизм – не единственный источник МЭ эффекта. В самом деле, магнитную фазу композита

составляют однодоменные частицы CFO, а этот феррит обладает высокой магнитной анизотропией. Для последней предполагается одноосная симметрия, направление легкой оси которой задает единичный вектор $\pm n$. Указанная анизотропия эквивалентна наличию внутри частицы магнитного поля H_A , направленного вдоль $\pm n$; в высокоанизотропном феррите H_A составляет несколько килоэрстед. В частице такого феррита магнитный момент μ «привязан» к оси легкого намагничивания достаточно большой энергией $\sim(H_A/\mu n)^2$, так что в отсутствие внешнего поля вектор μ стационарно ориентирован вдоль одного из допустимых направлений оси анизотропии.

Любое внешнее поле H , неколлинеарное μ , создает момент сил, стремящийся повернуть этот вектор в положение $\mu \parallel H$. Однако из-за сильной связи μ с осью легкого намагничивания поворот магнитного момента влечет за собой и поворот частицы как целого. Полимерная матрица, куда встроена частица, оказывает сопротивление этому повороту и вынужденно деформируется. Вследствие этого в композите возникают внутренние механические напряжения, которые, как любые другие, заставляют пьезоэлектрическую матрицу поляризоваться. Однако причина этой поляризации – стремление частиц к механическому повороту – очевидно, никак не связана с их магнитострикцией, то есть с изменением формы. Будем называть такой способ возбуждения МЭ сигнала *магнитоактивным* по аналогии с магнитоактивными эластомерами [26].

Подчеркнем разницу между двумя представленными разновидностями МЭ эффекта – *магнитострикционным* и *магнитоактивным* (его можно назвать также *магнито-ротационным*). Она касается условий измерения магнитоэлектрического коэффициента α_M . Магнитострикционный эффект подразумевает наличие поля смещения H_0 (иначе разность потенциалов будет нулевой) и взаимную параллельность H_0 и пробного

¹ Здесь $\varepsilon(H) = \Delta l/l$ – относительная деформация тела в ответ на H_0 . В рассматриваемом случае линейной стрикции ε всегда пропорциональна коэффициенту λ данного вещества, но зависит и от приложенного поля, при этом $\varepsilon(0) = 0$

поля H . Для наблюдения магнитоактивного эффекта наличие внешнего поля смещения вовсе не является обязательным. При $H_0=0$ эту роль берет на себя поле анизотропии частицы H_A , вдоль которого ориентирован магнитный момент частицы в отсутствие возмущений. Таким образом, максимальный пьезоэффект и, значит, наибольшую восприимчивость α_M следует ожидать в ситуации, когда H направлено перпендикулярно H_A . Иными словами, в отличие от магнитострикционного, магнитоактивный МЭ эффект будет существовать независимо от наличия H_0 .

Как было указано, в настоящее время в литературе по композитным феррит-полимерным пьезоэлектрикам господствует представление, что наблюдаемый МЭ эффект имеет исключительно стрикционную природу. Иными словами, магнитоактивный механизм полностью игнорируется. Это тем более странно, что среди реальных систем можно найти, хотя их пока и не много, примеры именно магнитоактивных пьезокомпозитов. Вероятно, самый интересный из них описан в работе [27] – это дисперсия нанопластинок ферроксигита ($\delta\text{-Fe}_3\text{O}(\text{OH})$) в PVDF-TrFE. Хотя этот гидроксид железа относительно слабомагнитен, он замечателен тем, что обладает практически нулевой магнитострикцией. Тем не менее, МЭ эффект в этой системе был достоверно зарегистрирован, что доказывает возможность магнитоактивного пути магнитоэлектрического преобразования даже при полном «выключении» стандартного механизма. Резонно предположить, что указанный вклад присутствовал также и в результатах измерений МЭ эффекта на PVDF композитах, наполненных другими анизометричными частицами: нанопластинками феррита бария [28, 29] и гидроксида $\text{Co(II)Fe(III)-O(OH)}$ [30], а также металлическими нанопроводами [31].

Совместное действие МЭ-эффектов: качественное рассмотрение

Сразу после признания факта сосуществования в композите двух различных по своим первичным причинам источников

внутренних напряжений возникает вопрос: при каких условиях эти вклады усиливают, а при каких – ослабляют друг друга. Для принципиального ответа на него рассмотрим в двумерной постановке частицу, помещенную в квадратную область упругого массива, одна из сторон которого закреплена. Магнитный момент частицы μ находится под действием внутреннего поля одноосной анизотропии H_A , направление которого задается единичным вектором n ; в отсутствие внешнего поля $\mu \parallel n$. Внешнее поле H накладывается перпендикулярно μ , тем самым создавая, наряду со стрикционной деформацией частицы, еще и момент сил ($\mu \times H$), стремящийся повернуть эту частицу как целое к направлению H .

На рис. 3 показаны найденные по расчетной процедуре, детали которой можно найти в исследовании [24], распределения касательной компоненты σ_{xz} тензора напряжений для двух вариантов взаимной ориентации магнитного момента μ частицы и приложенного поля H . Расчет выполнен при числовых значениях материальных параметров типичных для CFO и PVDF (в том числе, константа магнитострикции считается отрицательной), однако для наглядности полученные значения деформации увеличены на несколько порядков. Благодаря этому хорошо видно, как отражаются рассматриваемые эффекты на форме частиц и форме образца в целом.

Как следует из рисунков, в обеих ситуациях действие магнитострикции одинаково: частица изменяет свою форму со сферической на продолговатую, при этом главная ось нового контура всегда направлена под заметным углом к направлению возмущающего поля. Это объясняется тем, что расчет выполнялся в приближении $H \ll H_A$, когда главную роль играют сдвиговые компоненты тензора напряжений. Магнитоактивный (магниторотационный) эффект не влияет на форму частицы, но стремится установить магнитный момент, а с ним и ось частицы, вдоль направления поля. Важно, однако, что момент магнитных сил меняет знак в зависимости от относительной ориентации

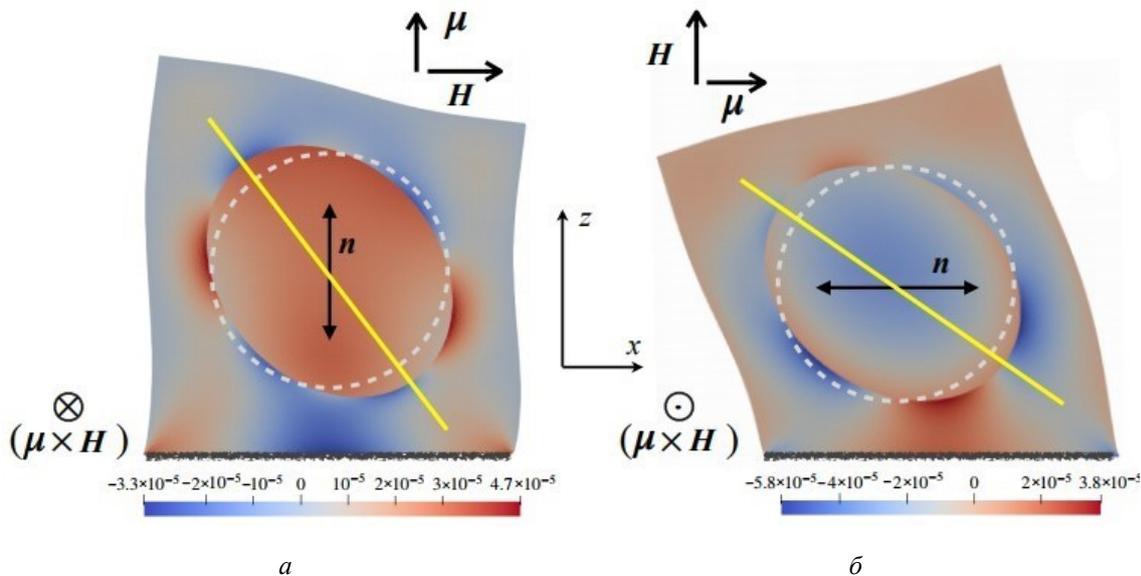


Рис. 3. Квадратная ячейка, содержащая однодомную феррочастицу, находящуюся под одновременным действием магнестрикционного и магнитоактивного (ротационного) эффектов; жёлтые линии отмечают положение длинной оси стрикционно-деформированной частицы. Панели а и б отличаются относительным положением векторов μ и H

векторов μ и H . (Уточним разницу: хотя указанные векторы в обоих случаях перпендикулярны друг другу, воображаемые повороты, которые могли бы их совместить, имеют противоположные знаки.)

Таким образом, хотя рис. 2 никак нельзя рассматривать как буквальное отражение реальной ситуации – стрикционные деформации, в действительности, имеют очень малую величину – он устанавливает принципиальный факт: в зависимости от ориентации характеристических векторов магнестрикционный и магнитоактивный (магниторотационный) эффекты либо противодействуют друг другу (рис. 3, а), либо действуют синергично (рис. 3, б).

**Совместное действие МЭ-эффектов:
количественные результаты**

Полное решение модельной задачи в трехмерной постановке представлено в работе [24]. Там методом компьютерного моделирования рассмотрена бесконечная пленка композита, одна поверхность которой закреплена на твердой подложке. Применяется подход RVE (Representing Volume Element), в нем пленка представляется бесконечным в двух направлениях однослойным массивом одинаковых представительных ячеек. Каждая ячейка имеет форму ку-

ба, в центре которого находится феррочастица, несущая магнитный момент μ постоянной величины. Одноосная магнитная анизотропия связывает направления n и μ внутри частицы. Благодаря этому, момент магнитных сил, создаваемый внешним полем H и непосредственно воздействующий только на μ , передается оси анизотропии n , а значит – в виде механического момента сил – телу частицы.

Размещение в каждой представительной ячейке только одной частицы в постановке RVE означает, что оси анизотропии всех частиц в пленке ориентированы одинаково. Такая ориентационная когерентность не является, однако, чисто модельной. Придать единое направление осям анизотропии частиц можно, высушивая пленку в сильном магнитном поле; отверждение закрепит созданную упорядоченность.

Частица в ячейке полностью окружена упругой сплошной средой (матрицей), свойства которой – плотность, модули упругости, коэффициент Пуассона, низкочастотная диэлектрическая проницаемость, тензор пьезомодулей – соответствуют PVDF, прошедшему процедуру поляризации. Установленное направление поляризации анизотропии матрицы зада-

ется единичным вектором ν . Предполагается, что на границах раздела феррочастица-матрица имеются полный контакт и неразрывное сцепление.

Поля – магнитное, электрическое и механических напряжений – соседних ячеек связаны между собой посредством периодических граничных условий. Таким образом, расчет отклика модельной пленки на внешнее магнитное поле соответствует решению связанной системы уравнений Максвелла и теории упругости, причем последняя используется в полной форме, то есть с учетом конечности деформаций. К этой системе добавлены уравнения состояния, описывающие: (i) магнитную восприимчивость модельной частицы CFO (модель Стонера-Вольфарта) и (ii) пьезоэлектрический отклик матрицы PVDF на создаваемые механические напряжения.

В статье [24] рассмотрены два варианта представительной ячейки, они отличаются направлениями магнитного момента сил, то есть знаком магнитоактивного (магниторотационного) МЭ эффекта. Соответствующие им конфигурации векторов, показаны на рис. 4 и аналогичны тем, что изображены на двумерных схемах рис. 3, иллюстрирующих результаты качественного анализа в разделе 6. Принципиальная разница заключается, однако, в

том, что сейчас решается трехмерная задача, и поэтому рис. 4, а, б – это сечения плоскостью xOz середины кубической ячейки, в которую заключена сферическая частица. Как будет видно ниже, важным конфигурационным параметром решения является направление вектора поляризационной анизотропии ν ; в плоскости рис. 4 его задает угол ϑ .

После того, как взаимные направления векторов \mathbf{n} , \mathbf{H} и ν в ячейке заданы, на первый план выходит задача механики. Действительно, ведь именно механические напряжения управляют МЭ преобразованием – связывают магнитное воздействие (причина) и электризацию (следствие). Таким образом, расчет тензора напряжений σ_{ik} в RVE ячейке данной конфигурации – а значит, во всей пленке с такой структурой – фактически определяет конечный результат.

Пространственное распределение нормальных и сдвиговых напряжений в ячейке не зависит от направления ориентации оси ν в матрице. Для нахождения координатной зависимости $\sigma_{ik}(\mathbf{r})$ описанная выше связанная система уравнений решается методом конечных элементов при фиксированном \mathbf{n} и для каждого последовательного значения \mathbf{H} . В итоге можно определить зависимость $\sigma_{ik}(\mathbf{H})$ в каждой точке ячейки.

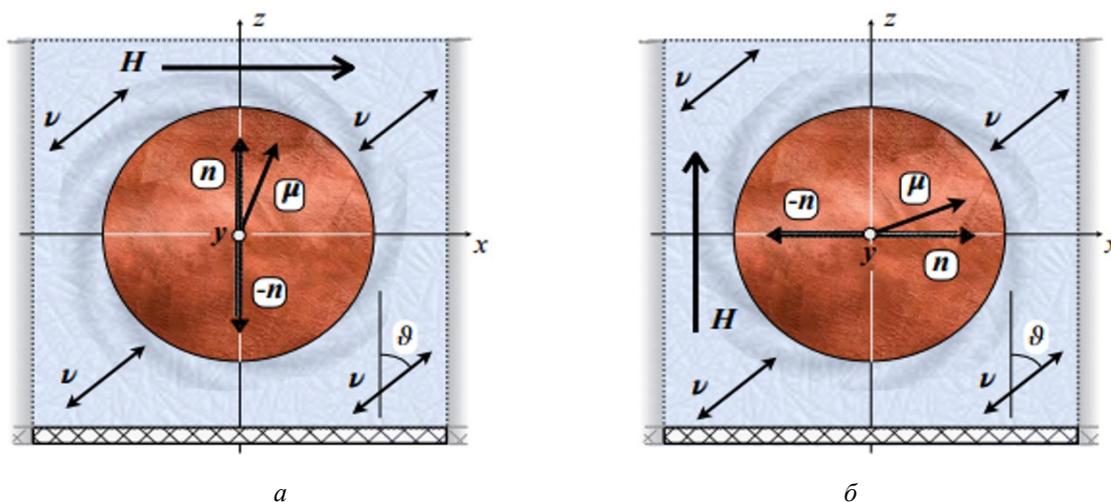


Рис. 4. Взаимное расположение характеристических векторов в RVE ячейках вариантов (а) и (б), их нижние грани закреплены на твёрдой подложке. Векторы магнитного момента μ показаны отклонёнными от равновесных положений в результате воздействия поля \mathbf{H} ; это виртуальные отклонения, их единственная роль – обозначить направление, в котором стремится повернуться частица как целое

Пример расчета распределений некоторых компонент тензора σ_{ik} в центральном сечении ячейки приведены на рис. 5. Поскольку, в отличие от рис. 3, здесь не использован «коэффициент усиления», подчеркивающий деформации частицы, визуально контур частицы кажется неизменным. Однако неоднородное распределение напряжений в ней – оно очевидно на всех кадрах рис. 3 – показывает, что такие деформации имеют место, хотя они и малы из-за высокого значения модуля Юнга CFO.

Напряженное состояние ячейки, подобное тому, что показано на рис. 5, может приводить к существенно различным распределениям электрического потенциала из-за того, что пьезоэлектрическая восприимчивость матрицы, см. раздел 1, является тензором. Для PVDF число независимых компонент тензора \hat{y} (или матрицы \hat{d}) равно трем; из них две определяют реакцию полимера на нормальные напряжения, а одна – на сдвиговые; в единицах СГС они суть $d_{31}=5 \cdot 10^{-7}$, $d_{33}=-10^{-6}$, $d_{15}=-7 \cdot 10^{-7}$. Поэтому в зависимости от того, как направлена ось поляризации анизотропии ν относительно главных осей тензора σ_{ik} , будет меняться и электрический отклик пленки, измеряемый по поперечной разности потенциалов $\Delta\varphi$ возникающей на ней.

Зависимости $\Delta\varphi(\vartheta)$, полученные описанным выше способом для модельной

пленки CFO-PVDF приведены на рис. 6 (для конфигурации 4, а) и рис. 7 (для конфигурации 4, б). На каждом рисунке две кривые. Одна показывает суммарный магнитоэлектрический эффект, объединяющий магнитострикционный и магнитоактивный вклады. Другая соответствует только магнитоактивному вкладу, при ее расчете магнитострикционный механизм был полностью выключен: коэффициент λ взят тождественно равным нулю.

Графики рис. 6 и 7 указывают на то, что экстремумы обоих эффектов в обеих конфигурациях расположены при ориентации диэлектрической оси поблизости от $\vartheta=45^\circ$. Этот факт связан, скорее всего, с тем, что в приближении линейной восприимчивости (условие $H < H_A$), использованном в источнике [24], главную роль играют сдвиговые компоненты тензора напряжений. Однако исчерпывающее объяснение появится лишь после того, как будет закончено моделирование МЭ эффекта при намагничивании ансамбля частиц феррита полем произвольной величины.

Графики рис. 6, 7 полностью подтверждают выводы качественного анализа из раздела 6. В первом случае магнитострикционный и магнитоактивный эффекты действуют «навстречу» один другому. В самом деле, нижняя кривая на рис. 6 практически целиком лежит в отрицательной области, так что суммарный МЭ эффект в

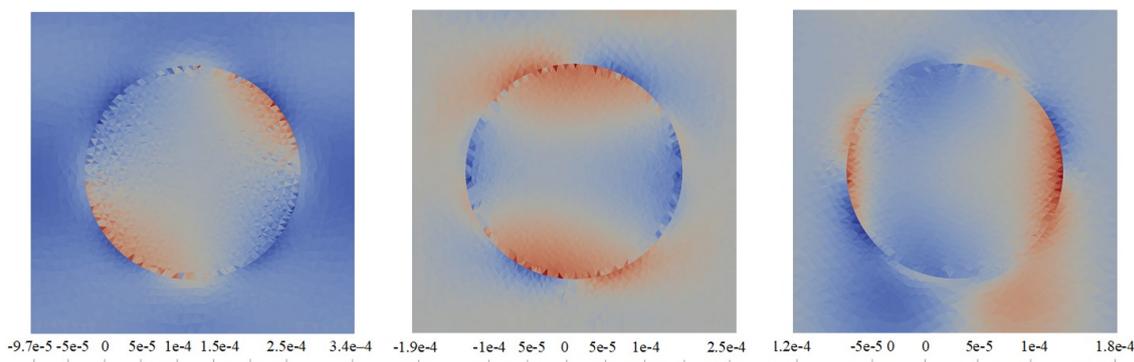


Рис. 5. Пример полного расчёта состояния RVE ячейки. Цветовые карты распределения компонент тензора напряжений в сечении плоскостью xOz ячейки рис. 4, а; слева направо: σ_{xz} , σ_{xx} , σ_{zz} . Значения компонент σ_{ik} приведены в безразмерных единицах, поэтому важны переходы цвета. Результаты получены в поле $H=kЭ$ для ячейки, имеющей следующие размерные параметры, по CFO: диаметр частицы 15 нм, коэффициент магнитострикции $\lambda = -200$ ppm, модуль Юнга 50 ГПа; по PVDF: модуль Юнга 2 ГПа

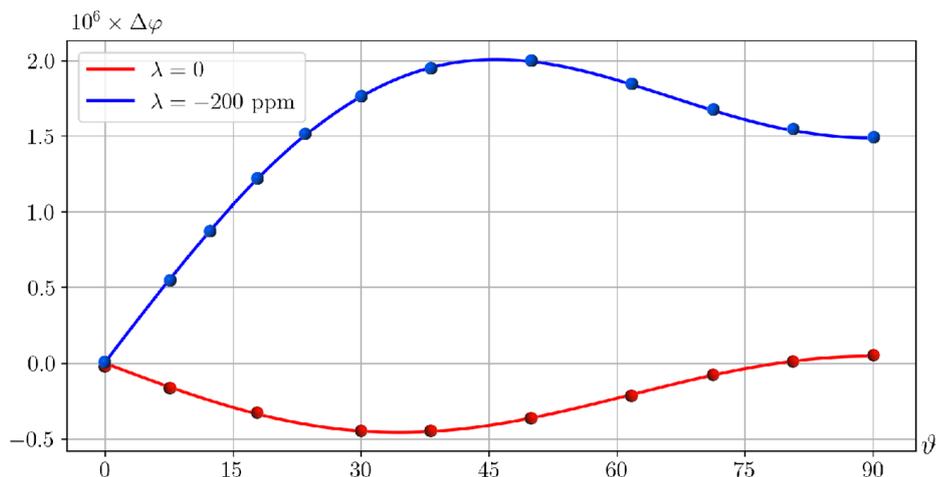


Рис. 6. Зависимость разности электрических потенциалов между сторонами модельной плёнки CFO-PVDF, ячейка которой имеет конфигурацию, показанную на рис. 4, а; приложенное поле $H=kЭ$

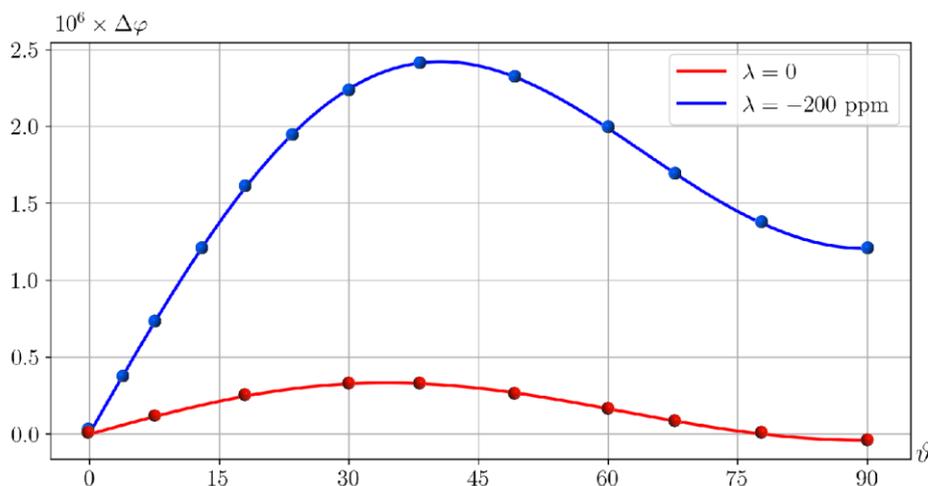


Рис. 7. Зависимость разности электрических потенциалов между сторонами модельной плёнки CFO-PVDF, ячейка которой имеет конфигурацию, показанную на рис. 4, б; приложенное поле $H=kЭ$

максимуме составляет примерно 2.0 в единицах графика. На рис. 7 видно, что оба эффекта «помогают» друг другу: нижняя кривая почти всюду имеет положительные значения, а суммарный МЭ эффект составляет в максимуме около 2.5.

Сопоставление графиков показывает также, что оценивать магнитоактивный (магниторотационный) эффект просто как половину разности между максимальными значениями кривых полного эффекта неверно. В самом деле, такая оценка дает ≈ 0.25 , в то время как парциальные графики, соответствующие условию $\lambda=0$, дают результат (по модулю) $\sim 0.4 \div 0.5$. Дело, ко-

нечно, в том, что конфигурации рис. 6, 7 не полностью эквивалентны: на них по-разному влияет направленность поля H относительно подложки, на которой закреплена пленка.

Обсуждение результатов и перспективы

Задача о магнитоэлектрическом эффекте в полимерном композитном мультiferроике достаточно сложна. Прежде всего из-за своей мультифизической сущности, назовем это так, заимствуя термин у известного программного пакета. Действительно, для понимания МЭ эффекта требу-

ется связать между собой физику магнитных полей и ферромагнетиков, физику электрических полей и пьезоэлектриков и механику деформируемых тел. Причем все элементы этой триады в равной степени важны и существенны.

Сложность обусловлена и композитным составом пленки, что подразумевает зависимость эффекта от большого набора материальных констант ее ингредиентов. Кроме этого, несмотря на то, что геометрия образца в целом задана, число конфигурационных степеней свободы – направления полей и осей анизотропии – которые можно варьировать, формально остается бесконечным. Но оборотной стороной этой сложности является и множество возможностей в выборе конкретных задач, решение которых может вылиться в разработку новых полезных вариантов МЭ преобразователей самого разнообразного назначения – от энергетики до наномедицины.

В этой связи приведем диаграмму из обзора [32], см. рис. 8. На ней показана динамика числа работ по магнитоэлектрикам и устройствам на их основе. Последние данные относятся к 2020 г. и, скорее всего, неполны, тенденция вряд ли поменялась. Знакомясь с этой статистикой, следует учитывать, что в общий

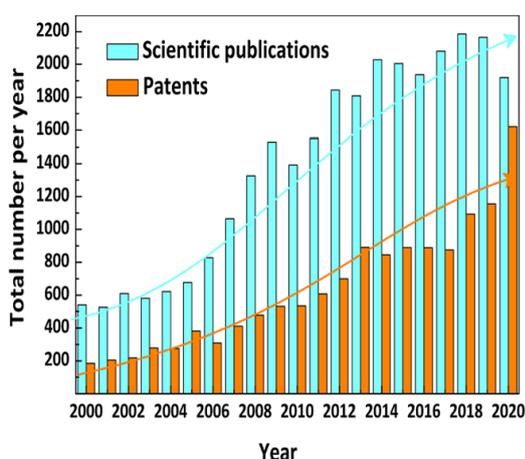


Рис. 8. Инфографика заимствована из работы [32]. Диаграмма показывает годовую динамику публикаций (статей и патентов), содержащих слова *magnetoelectric, magneto-electric* и *multiferroic*

подсчет попало, конечно, значительное количество публикаций, где рассматриваются твердотельные системы. Однако даже выборочный анализ (по ключевым словам) статей, вышедших после 2020 г., показывает, что внутри этого растущего в целом множества происходит также и увеличение относительной доли исследований и применений, относящихся к полимерным композитам.

Из всей массы интересных задач, которыми так богата физика МЭ композитов, выберем для обсуждения одну, постановку которой легко усмотреть, осмысливая представленные выше результаты. В сделанной работе был подробно рассмотрен пример классического современного МЭ преобразователя малой мощности – композитной пленки состава CFO-PVDF. Как оказалось, доля магнитоактивного (магниторотационного) эффекта, который прежде при характеристике таких систем вообще не принимался во внимание, измеряется десятками процентов.

Это заметный вклад, но отнюдь не определяющий. Из графиков рис. 6, 7 очевидно, что главную роль в генерации $\Delta\phi$ всегда играет магнитострикционная компонента эффекта. Тем самым еще раз подтверждена правильность подхода конструкторов преобразователей этого типа, считающих ключевым элементом стратегии использование феррочастиц из материала с как можно более высокой константой магнитострикции. Именно поэтому из ферритов выбирается CFO, а из проводящих ферромагнетиков – Терфенол-D.

Нисколько не отрицая успех стандартного подхода, попытаемся выйти за его рамки, поставив вопрос о том, могут ли МЭ эффекты поменяться ролями так, чтобы главным механизмом преобразования стал магнитоактивный, а не магнитострикционный. Ответ на этот вопрос дает простая оценка, предложенная в работе [24]. Сопоставление вращающего момента, с которым внешнее поле, действуя на магнитный момент частицы,

стремится повернуть ее как целое, и эквивалента такого момента, созданного магнитострикцией, приводит к критерию в форме

$$\xi \sim M_S H_A / 2 |\lambda_S| E_p; \quad (1)$$

Здесь M_S – намагниченность насыщения феррита, H_A – его внутреннее поле анизотропии, λ_S – константа магнитострикции феррита в насыщении, E_p – модуль Юнга полимерной матрицы. Для рассмотренной системы CFO-PVDF подстановка характерных значений материальных параметров, действительно, дает для относительной доли магнито-ротационного эффекта $\xi \sim 0.2$, в хорошем соответствии с результатами детального расчета, см. графики рис. 6, 7.

Согласно формуле (1), магнитоактивная компонента будет играть преобладающую роль, если окажется выполненным условие $\xi > 1$. Для его реализации нужен композит с не слишком жесткой матрицей, магнитный наполнитель которого обладает высокой магнитной анизотропией и малой константой магнитострикции. Из литературы можно почерпнуть, что роль матрицы может сыграть полимерная смесь с 70% содержанием PVDF, которая имеет модуль Юнга ~ 700 МПа [33]. В качестве наполнителя в равной мере пригодны ферриты бария и стронция. Они обладают достаточно высокой намагниченностью насыщения, одноосной анизотропией, поле H_A в них составляет порядка 7 кЭ, а константы магнито-стрикции обоих ферритов очень близки – 9–13 ppm [4, 34] – что, как минимум, на порядок ниже, чем у CFO. Подстановка этих значений в формулу (1) дает $\xi \sim 20$, то есть двадцатикратное превышение магнитоактивного эффекта над магнито-стрикционным. Даже если считать эту оценка завышенной, она определенно указывает на возможность создать МЭ преобразователь нестрикционного типа.

Выводы

Сведения и примеры, представленные в разделах 2–8, демонстрируют существенную роль магнитоактивного

(или, что может быть, точнее – магнито-ротационного) механизма магнитоэлектрического эффекта в полимерных композитах. Высокодисперсный феррит кобальта, используемый в стандартном материале типа CFO-PVDF в качестве стрикционного наполнителя, одновременно придает этому материалу и способность к магнитоактивному поведению. Хотя главный вклад, бесспорно, дает стрикция, даже здесь роль магнитоактивного эффекта отнюдь не исчезающе мала. Альтернативный выбор ингредиентов композита может полностью поменять ситуацию, и тогда ведущая роль перейдет к магнитоактивному эффекту.

В то же время, приведенные соображения ни в коем случае нельзя считать исчерпывающим доказательством преимуществ магнитоактивного принципа МЭ преобразования в сравнении с магнито-стрикционным, тем более – в практическом отношении. Вполне возможно, что пьезопленки, работающие исключительно на магнитоактивном эффекте, навсегда останутся предметом чисто научного интереса. Однако, с нашей точки зрения, выполненный анализ соотношения вкладов в МЭ эффект на стандартной CFO-PVDF пленке и оценочное сравнение с альтернативным вариантом – это серьезные аргументы в пользу того, что при разработке пленочных магнитоэлектриков нужно обязательно учитывать оба механизма пьезоэффекта и оптимизировать их в сочетании, а не по отдельности. Отметим в заключение, что обсуждаемые результаты и выводы, которые на них основаны, не могли быть получены иначе, как путем мезоскопического моделирования МЭ композитов в рамках мультифизического подхода.

Авторы благодарят
В.В. Родионову, А.А. Игнатову и П.А. Ершова,
сотрудников НОЦ «Умные материалы
и биомедицинские приложения»
БФУ им. И. Канта, за полезные обсуждения.

Библиографический список

1. *van Suchtelen J.* Product Properties: A new application of composite materials // Phillips Research Reports. – 1972. – Vol. 27. – P. 28–37.
2. *van den Boomgaard J., van Run A.M.J.G., van Suchtelen J.* Magnetolectricity in piezoelectric-magnetostrictive composites // Ferroelectrics. – 1975. – Vol. 10. – P. 295–298.
3. *Joule J.P.* On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars // London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 3. – 1847. – Vol. 30. – P. 76–87.
4. *Белов К.П.* Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, ГИФМЛ. 1987.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.
6. *Curie J., Curie P.* Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées // Bulletin de Minéralogie. – 1880. – Vol. 3–4. – P. 90–93.
7. *Lovinger A.J.* Recent developments in the structure, properties, and applications of ferroelectric polymers // Japanese Journal of Applied Physics. – 1985. – Vol. 24. – Suppl. 2. – P. 18–22.
8. *Zhao X.-Z., Bharti V., Zhang Q.M., Romotowski T., Tito F., Ting R.* Electromechanical properties of electrostrictive poly(vinylidene fluoride–trifluoroethylene) copolymer // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73. – P. 2054–2056.
9. *Goen P.* Introduction to Piezoelectric Materials and Components. Apeldoorn: Stichting Applied Piezo, 2018.
10. *Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehlan D., Srinivasan G.* Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status, and future directions // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 103. – P. 031101.
11. *Jiang J., Liu S., Feng L., Zhao D.* A review of piezoelectric vibration energy harvesting with magnetic coupling based on different structural characteristics // Micromachines. – 2021. – Vol. 12. – P. 436.
12. *Kopyl S., Surmenev R., Surmeneva M., Fetisov Y., Kholkin A.* Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine – A review // Materials Today. – 2021. – Vol. 12. – P. 100149.
13. *Zhang J., Chen X., Wang X., Fang C., Weng G.J.* Magnetic, mechanical, electrical properties and coupling effects of particle reinforced piezoelectric polymer matrix composites // Composite Structures. – 2023. – Vol. 304. – P. 116450.
14. *Martins P., Kolen'ko Yu.V., Rivas J., Lanceros-Méndez S.* Tailored magnetic and magnetolectric responses of polymer-based composites // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2015. – Vol. 7. – P. 15017–15022.
15. *Leung C.M., Li J., Viehland D., Zhuang X.* A review on applications of magnetolectric composites: from heterostructural uncooled magnetic sensors, Energy harvesters to highly efficient power converters // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. – Vol. 51. – P. 263002.
16. *Tang B., Zhuang J., Wang L., Zhang B., Lin S., Jia F., Dong L., Wang Q., Cheng K., Weng W.-J.* Harnessing cell dynamic responses on magnetolectric nanocomposite films to promote osteogenic differentiation // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – P. 7848–7851.
17. *Mushtaq F., Torlakcik H., Vallmajo-Martin Q., Siringil E.C., Zhang J., Röhrig C., Shen Y., Yu Y., Chen X.-Z., Müller R., Nelson B.J., Pané S.* Magnetolectric 3D scaffolds for enhanced bone cell proliferation // Applied Materials Today. – 2019. – Vol. 16. – P. 290–300.
18. *Ferson N.D., Uhl A.M., Andrew J.S.* Piezoelectric and magnetolectric scaffolds for tissue regeneration and biomedicine: A review // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2020. – Vol. 68. – P. 229–241.
19. *Costa C.M., Cardoso V.F., Martins P., Correia D.M., Gonçalves R., Costa P., Correia V., Ribeiro C., Fernandes M.M., Martins P.M., Lanceros-Méndez S.* Smart and multifunctional materials based on electroactive poly(vinylidene fluoride): recent advances and opportunities in sensors, actuators, energy, environmental, and biomedical applications // Chemical Reviews. – 2023. – Vol. 123. – P. 11392–11437.
20. *Guduru R., Liang P., Hong J., Rodzinski A., Hadjikhani A., Horstmyer J., Levister E., Khizroev S.* Magnetolectric 'spin' on stimulating the brain // Nanomedicine. – 2015 – Vol. 10. – P. 2051–2061.
21. *Singer A., Dutta S., Lewis E., Chen Z., Chen J.C., Verma N., Avants B., Feldman A.K., O'Malley J., Beierlein M., Kemere C., Robinson J.T.* Magnetolectric materials for miniature, wireless neural stimulation at therapeutic frequencies // Neron. – 2020. – Vol. 107. – P. 631–643.
22. *Chen X., Zhang J., Gao Y., Weng G.J.* Correlation between meso-structures and magnetolectric properties in 0-3 magnetolectric composites // International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 262. – P. 108746.
23. *Столбов О.В., Райхер Ю.Л.* Моделирование пьезоэффекта в полимерной плёнке, наполненной дисперсным пьезоэлектриком // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16. – С. 517–527.

24. Stolbov O.V., Ignatov A.A., Rodionova V.V., Raikher Yu.L. Modelling the effect of particle arrangement on the magnetoelectric response of a polymer multiferroic film // *Soft Matter*. – 2023. – Vol. 19. – P. 4029–4040.
25. Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Magnetostrictive and magnetoactive effects in piezoelectric polymer composites // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – P. 31.
26. Farshad M., Benine A. Magnetoactive elastomer composites // *Polymer Testing*. – 2004. – Vol. 23. – P. 347–353.
27. Martins P., Larrea A., Gonçalves R., Botelho G., Ramana E.V., Mendiratta S.K., Sebastian V., Lanceros-Méndez S. Novel anisotropic magnetoelectric effect on #-FeO(OH)/P(VDF-TrFE) multiferroic composites // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2015. – Vol. 7. – P. 11224–11229.
28. Gutiérrez J., Martins P., Gonçalves R., Sencadas V., Lasheras A., Lanceros-Méndez S., Barandiar J.M. Synthesis, physical and magnetic properties of BaFe12O19/P(VDF-TrFE) multifunctional composites // *European Polymer Journal*. – 2015. – Vol. 69. – P. 224–231.
29. Anithakumari P., Mandal B.P., Abdelhamid E., Naik R., Tyagi A.K. Enhancement of dielectric, ferroelectric and magneto-dielectric properties in PVDF-BaFe12O19 composites // *RSC Advances*. – 2016. – Vol. 6. – P. 16073–16080.
30. Gonçalves R., Larrea A., Zheng T., Higgins M.J., Sebastian V., Lanceros-Méndez S., Martins P. Synthesis of highly magnetostrictive nanostructures and their application in a polymer-based magnetoelectric sensing device // *European Polymer Journal*. – 2016. – Vol. 84. – P. 685–692.
31. Alnassar M.Y., Ivanov Yu.P., Kosel J. Flexible magnetoelectric nanocomposites with tunable properties // *Advanced Electronic Materials*. – 2016. – Vol. 2. – P. 1600081.
32. Liang X., Matyushov A., Hayes P., Schell V., Dong C., Chen H., He Y., Will-Cole A., Quandt E., Martins P., McCord J., Medarde M., Lanceros-Méndez S., van Dijken S., Sun N.X., Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2021. – Vol. 57. – P. 400157.
33. Seraji S.M., Guo Q. Polymorphism and crystallization in poly(vinylidene fluoride)/poly(ϵ -caprolactone)-block- poly(dimethylsiloxane)-block- poly(ϵ -caprolactone) blends // *Polymers International*. – 2020. – V. 69. – P. 173–183.
34. Licci F., Rinaldi S. Magnetostriction of some hexagonal ferrites // *Journal of Applied Physics*. – 1981. – Vol. 52. – P. 2442–2443.

NON-FARADAY MAGNETOELECTRICITY IN THE CONTEXT OF MESOMECHANICS

Stolbov O.V., Raikher Yu.L.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Non-faraday magnetoelectricity in the context of mesomechanics // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2024. – № 1. – P. 15–32. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.2>

The paper outlines the physical basis of magnetoelectric conversion by means of the piezoelectric effect. The whole class of materials capable of such conversion is termed as *multiferroics*. An important group of those make composite media in which the ferromagnetic (or ferrimagnetic) and piezoelectric components dwell in close contact. The magnetic field, acting on the ferromagnet arises internal mechanical stresses via it, which are perceived by the other phase of the composite and launches the piezoelectric effect in it, i.e. makes the sample a source of potential difference. Whereas the ferromagnetic phase is always a solid substance, the piezophase can be not only a solid but also a polymer, and this expands considerably the application prospects of such convertors. Fundamental analysis shows that in a polymeric composite, ferromagnet particles under the action of an external field excite the piezoeffect in two ways simultaneously: through magnetostriction (change of the particle shape) and through a mechanical displacement of the particle body. Although these two methods are, in principle, independent, in a ferrite-polymer composite they always coexist, and under a given set of conditions their joint action might either enhance or reduce the conversion efficiency. This general conclusion is illustrated by the results of numerical modelling of the magnetoelectric

effect in a composite film whose content mimics one of the currently best known polymer multiferroics: the dispersion of cobalt ferrite particles in a matrix of polyvinylidene fluoride (CFO-PVDF).

Keywords: polymer multiferroics, magnetoelectric conversion, magnetostriction, piezoeffect, polymer piezocomposite films.

Сведения об авторах

Столбов Олег Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14; e-mail: sov@icmm.ru

Райхер Юрий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН», старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»; e-mail: raikher@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 19.03.2024 г.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИТОДОБАВКИ ИЗ АСТРАГАЛА НУТОВОГО В СОСТАВЕ КОНЦЕНТРАТНОЙ ЧАСТИ РАЦИОНА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ *

И.Н. Жданова, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Н.А. Морозков, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Е.В. Суханова, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Для цитирования:

Жданова И.Н., Морозков Н.А., Суханова Е.В. Оценка эффективности фитодобавки из астрагала нутового в составе концентратной части рациона сельскохозяйственной птицы // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 33–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.3>

Представлены основные результаты скормливания кормовой фитодобавки из астрагала нутового сельскохозяйственной птице яичного направления с целью улучшения процессов метаболизма и увеличения продуктивности. Исследования проводились в Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН в 2022 году. основополагающая задача сельского хозяйства Российской Федерации представляет собой умножение реализации животноводческой продукции и объемов производства. Применение добавок, состоящих из местных растительных ресурсов, таких как кормовая фитодобавка из астрагала нутового, обладающая высоким содержанием различных биологически активных веществ, может оказаться хорошим вариантом поступления необходимых питательных веществ в организм птицы. Испытуемая кормовая фитодобавка положительно влияет на такие показатели, как яйценоскость, интенсивность яйцекладки, масса яиц, количество каротиноидов и толщина скорлупы яиц. Исследование направлено на изучение возможности включения кормовой добавки в состав комбикормов птиц в условиях интенсификации производства. При введении кормовой фитодобавки в состав основного рациона кур-несушек были получены следующие результаты: соотношение массы белка к массе желтка во второй опытной группе свидетельствуют о повышении доли желтка в составе яйца на 1,25% по сравнению с контрольной, большем содержании каротина в кормосмеси, что отразилось на его содержании в яйцах (соответственно на 1,9% и 7,0% в сравнении с контрольной группой). Было отмечено, увеличение массы скорлупы, благодаря повышению ее толщины у яиц от кур второй опытной группы, на 0,34% по сравнению с контрольной группой.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2030 гг. по направлению «Поиск, изучение генетических источников и доноров хозяйственно-ценных признаков многолетних кормовых трав с разработкой научных основ технологий возделывания и использования, экономически значимых для регионов Нечерноземья видов и сортов сельскохозяйственных культур, в том числе, обладающих биологической активностью», (тема № АААА-А19-119032190060-4).

Ключевые слова: лекарственные растения, биологически активные вещества, кормопроизводство, кормовая фитодобавка, сельскохозяйственная птица, иммуномодуляторы, фитотерапевтика.

Введение

В обеспечении продовольственной безопасности страны большое значение имеет производство рентабельной и высококачественной экологически безопасной продукции птицеводства. На продуктивность сельскохозяйственной птицы влияет множество факторов как генетических, так и средовых. В большой степени продуктивность птицы зависит от факторов кормления и содержания. Резкие смены корма, микроклимата, присутствие каких-либо внешних раздражителей (вибрации, резкие шумы и т.д.) приводят к паузе в работе иммунной системы организма, оплодотворяемости и выводимости яиц. Даже после проведения восстановительных процедур, таких как дополнительное введение в корм витаминно-минеральных добавок, качество яиц восстанавливается не сразу, а через некоторое время. Полностью использовать генетический потенциал птицы можно в основном за счет ввода в ее рационы различных добавок, обогащающих корм. Совершенствование кормления птицы предусматривает производство полнорационных комбикормов, обогащенных белковыми добавками и биологически активными веществами, с максимальным использованием местных и нетрадиционных кормовых средств. В настоящее время использованию биологически активных веществ в виде кормовых фитодобавок с целью повышения продуктивности птицы отводится важная роль. Включение в комбикорма этих добавок позволяет повысить эффективность использования кормов, улучшить обмен веществ, увеличить продуктивность.

В лаборатории биологически активных кормов Пермского НИИСХ с 1969 г. ведутся исследования сортов растений из дикой флоры, обладающих биологически активными веществами для повышения иммунного статуса и увеличения реализации генетически заложенного потенциала

у продуктивных животных и птиц. Преимуществом выращиваемых в институте растений, обладающих адаптогенными свойствами, является возможность их применения без предварительного иммунологического обследования животных и птиц. В качестве перспективного источника биологически активных веществ представляется интересным рассмотреть растения рода Астрагал.

Астрагал нутовый (*Astragalus cicer*) – крупное травянистое многолетнее растение рода Астрагал (*Astragalus*), принадлежащего семейству Бобовые (*Fabaceae*). Растение содержит различные органические кислоты, включая аскорбиновую, которая стимулирует иммунную систему человека, а также витамины группы В, полисахариды. Корм из астрагала совместим с другими кормовыми добавками и не содержит вредных для человека и животных компонентов. По химическому составу и питательной ценности близок к клеверу и люцерне, однако содержит алкалоиды и сведения о его поедаемости животными и птицей противоречивы. Например, астрагал нутовый, распространенный в Пермском крае, содержит в своем составе непротеиновые аминокислоты, глицины, фенольные кислоты и их эфиры, высшие жирные кислоты, полисахариды, витамины группы В, С, Е, РР, лимонную и янтарную кислоты, флавоноиды, микроэлементы. Многочисленные исследования, проведенные в основном *in vitro*, показывают, что флавоноиды могут быть отнесены к неферментным антиоксидантам, способным прямо или косвенно ослаблять или предупреждать клеточные повреждения, вызываемые свободными радикалами.

Его богатейший химический состав свидетельствует о том, что лекарственные формы из этого растения могут оказывать положительное влияние на различные функциональные системы организма, изучение которых, несомненно,

является актуальным научным направлением в ряде наук, в том числе, в ветеринарии и кормлении [1; 2, с. 10–12].

Ранее проведенные исследования показали, что такие сельскохозяйственные культуры как левзея сафлоровидная (*Rhaponticum carthamoides*), эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria*), клевер луговой (*Trifolium pratense*) также содержат в своем составе протеин, сахара, витамины, аминокислоты, дубильные вещества и флавоноиды [8–10]. Анализ биохимического состава и суммы экистероидов и флавоноидов в наземных частях астрагала нутового проводили в аналитической лаборатории Пермского НИИСХ и на кафедре физиологии растений ПГНИУ.

Цель исследований – изучить влияние скармливания курам-несушкам кормовой фитодобавки из зеленой массы астрагала нутового в составе концентратной части рациона на обмен веществ в организме и яйценоскость кур-несушек.

Научная новизна исследований – получены экспериментальные данные о влиянии биологически активных веществ новой для зоны Урала перспективной кормовой культуры астрагал нутовый на основные производственные показатели и морфобиохимический состав крови сельскохозяйственной птицы.

Методика. В летне-зимний период 2022 года нами были проведены научно-производственные опыты по скармливанию кормовой фитодобавки из астрагала нутового курам-несушкам кросса ЛОМАН БРАУН-ЛАЙТ на одной из крупных производственных баз птицефабрики Пермского края. При проведении научно-производственного опыта было сформировано 3 группы кур-несушек по 33 головы в каждой. Возраст птицы в начале опыта составил 27 недель. Формирование групп проводилось по методу групп-аналогов [6]. Птица содержалась в клеточных батареях КБН-1 при свободном доступе к корму и воде.

Предметом исследования являлся рацион кормления кур-несушек с использованием комбикормов, сбалансированных

по основным элементам питания с включением в состав комбикорма кормовой фитодобавки из астрагала нутового: в первой опытной группе 3,6% от массы основного рациона, во второй опытной – 4,8% от массы основного рациона. Была использована добавка из астрагала нутового для повышения биологической полноценности комбикорма, рекомендуемого для использования в кормлении кур-несушек. Кормление кур-несушек опытных групп проводили традиционной кормовой смесью в соответствии с рекомендуемыми нормами кормления. Кормосмесь готовили на птицефабрике в кормоцехе. Птицу кормили 2 раза в сутки (в 8 и 16 часов дня) из расчета 130 г/гол [5]. Продолжительность скармливания 183 дня. Опыт проведен методом парных аналогов по методикам Имангулова и Фисинина [4, 9].

Оценка питательности рационов проведена по фактическому химическому составу кормов. Все рационы разработаны с учетом потребности животных в питательных веществах в соответствии с существующими нормами кормления. Рационы кормления и условия содержания кур в опытных и контрольных группах были одинаковыми и типичными для предприятия [8, 9].

Кровь и ее сыворотку исследовали в начале и в конце опытов с целью контроля обменных процессов в организме птицы под влиянием испытуемой добавки в разных дозах. Для проведения исследований кровь брали утром из подкрыльцевой вены, до кормления у птиц из каждой группы по 3 курицы-несушки.

Морфобиохимические исследования крови проводились общепринятыми методиками на базе аккредитованного ГБУВК «Пермский ВДЦ» [3].

Обработку экспериментальных данных проводили по методическим указаниям Н.А. Плохинского на ПВМ с использованием программы Microsoft Excel 2007 [7].

Результаты и обсуждение. Анализ биохимического состава корма показал, что содержание каротина в витаминно-травяной муке из астрагала нутового,

заготовленной для проведения эксперимента, составило $83,02 \pm 1,28$ мг/кг при норме 200 мг/кг в 1 кг СВ ВТМ, ОЭ – $9,54$ МДж/кг при норме 10,00 МДж/кг СВ.

При изучении морфологического состава крови отклонения от физиологической нормы не были обнаружены по всем изучаемым показателям у всех групп кур (табл. 1).

Результаты определения биохимических показателей крови кур-несушек после скармливания астрагала нутового представлены в табл. 2, анализ показывает, что у кур-несушек опытных групп после введения в рацион добавки из астрагала нутового биохимические показатели крови находились в пределах физиологической нормы.

Количество общего белка первой опытной группы было достоверно выше по сравнению с контролем – на 8,8% ($P \geq 0,95$). При биохимическом исследовании установлено, что у опытной группы кур, получавших фитодобавку из астрагала нутового, показатели содержания глюкозы были выше значений контрольной группы и на-

ходились в пределах $12,2 \pm 0,1$ – $13,5 \pm 0,2$ ммоль/л. Содержание кальция и фосфора в крови животных в опытных и контрольной группах существенно не отличалось.

Введение в состав рационов кур-несушек фитодобавки из астрагала нутового оказало некоторое влияние на яичную продуктивность птицы (табл. 3). Возраст достижения пика яйценоскости был примерно одинаковым у всех экспериментальных групп (38 недель). Наибольшая продуктивность кур-несушек отмечена в опытных группах за счет замедленного темпа снижения яйценоскости.

В целом за период научно-производственного опыта у кур-несушек первой и второй опытных групп была выше интенсивность яйцекладки на 8,76% и 3,52% и сбор яиц на несушку на 8,77% и 3,51%, соответственно, по сравнению с контрольной группой.

Устойчивые различия между группами по яйценоскости проявились через 9-10 недель после начала научно-хозяйственного опыта. Начиная с этого времени, у кур-несушек опытных групп интенсив-

Таблица 1.

Морфологические показатели крови кур-несушек ($M \pm m$, n=3)
Morphological blood parameters of laying hen ($M \pm m$, n=3)

Показатель	Группы животных		
	контрольная	первая опытная	вторая опытная
После скармливания			
Гемоглобин, г/100 мл	$135,0 \pm 0,2$	$140,3 \pm 0,4$	$139,7 \pm 0,1$
Эритроциты, $10^{12}/л$	$2,0 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,6$
Лейкоциты, $10^9/л$	$28,0 \pm 0,3$	$28,3 \pm 0,1$	$34,7 \pm 0,2^*$

Примечание: * – $P \geq 0,95$; ** – $P \geq 0,99$; *** – $P \geq 0,999$ по сравнению с контрольной

Таблица 2.

Биохимические показатели сыворотке крови кур, % ($M \pm m$, n=3)
Biochemical parameters of the blood serum parameters of laying hen, % ($M \pm m$, n=3)

Показатель	Группы животных		
	контрольная	первая опытная	вторая опытная
В конце опыта			
Общий белок, г/л	$75,9 \pm 0,4$	$83,3 \pm 0,5^*$	$78,8 \pm 0,4$
Глюкоза, ммоль/л	$12,0 \pm 0,3$	$13,5 \pm 0,1$	$12,2 \pm 0,1$
Холестерин, ммоль/л	$3,9 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,2$
Общий кальций, ммоль/л	$4,3 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,1$
Неорганический фосфор, ммоль/л	$3,1 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,2$
Магний, ммоль/л	$1,0 \pm 0,7$	$1,3 \pm 1,0$	$1,2 \pm 0,8$

Примечание: * – $P \geq 0,95$; ** – $P \geq 0,99$; *** – $P \geq 0,999$ по сравнению с контрольной

Таблица 3.

Яичная продуктивность кур-несушек
Egg productivity of laying hens

Группа	Возраст достижения пика яйценоскости, неделя	Интенсивность яйценоскости при достижении пика, %	Темп снижения яйценоскости, %	Яйценоскость на среднюю несушку, штук	Масса яйца, г	Получено яичной массы на среднюю несушку, кг	Интенсивность яйценоскости
Контрольная	38±0,22	99,7	0,84	89,49 ±3,44	64,64±0,67	10,58±0,76	92,71±2,76
Первая опытная	38±0,43	100	0,82	90,48 ±2,76	63,45±0,35	10,51±1,12	94,96±2,68
Вторая опытная	38±0,14	100	0,81	89,72 ±4,49	65,62±1,23	10,77±0,98	95,64±3,49

ность яйцекладки была выше, чем у птиц контрольной группы. Установлено, что использование в кормлении кур-несушек фитодобавки на основе астрагала нутевого способствовало повышению выхода яичной массы из расчета на среднюю несушку в первой и второй опытных группах на 1,88% и 2,75%, соответственно, по сравнению с контролем.

На уровень обмена веществ большое влияние оказывают жирорастворимые витамины, поскольку они являются биологическими катализаторами и, обладая антиоксидантными свойствами, оказывают большое влияние на обменные процессы. Анализ А-витаминной обеспеченности организма кур-несушек подтвердил данные, полученные нами при биохимическом исследовании яиц ($P \geq 0,95$) (табл. 4).

Введение в состав кормосмесей кур-несушек первой и второй опытных групп фитодобавки из астрагала нутевого спо-

собствовало большему содержанию каротина в кормосмеси, что отразилось на его содержании в яйцах (соответственно на 1,9% и 7,0% в сравнении с контролем). В яйцах кур-несушек опытных групп содержание каротина было выше, чем в контрольной группе. Эта тенденция к увеличению содержания каротина в яйцах птицы, получавшей в рационе фитодобавку, прослеживается четко, а наиболее выраженной она оказалась у кур-несушек второй опытной группы. Была отмечена тенденция к увеличению содержания витамина А, по сравнению с контролем, в яйцах кур-несушек первой и второй опытных групп (соответственно на 1,3 мкг/г и 1,8 мкг/г в сравнении с контролем).

Увеличение яйценоскости косвенным образом сказывается на морфометрическом составе яйца кур-несушек (табл. 5). Анализируя данные таблицы, установили,

Таблица 4.

Содержание в желтке яиц каротиноидов и витаминов, мкг/г
The content of carotenoids and vitamins in egg yolk, mcg/g

Наименование показателя	Группы		
	контрольная	первая опытная	вторая опытная
Каротиноиды, мкг/г	4,50±0,11	6,40±0,05	11,50±0,22*
Витамин А, мкг/г	12,20±0,19	13,50±0,23	15,00±0,37*
Витамин Е, %	0,21±0,03	0,20±0,01	0,22±0,03

Примечание: * – $P \geq 0,95$; ** – $P \geq 0,99$; *** – $P \geq 0,999$ по сравнению с контрольной

Морфометрический состав яиц кур-несушек (n=5)
Morphometric composition of eggs of laying hens (n=5)

Наименование показателя	Группы		
	контрольная	первая опытная	вторая опытная
Масса яйца, г	70,10±0,21	65,66±0,18	69,59±0,26
Масса желтка, г	18,64±0,26	17,12±0,29	18,71±0,25
Масса желтка, %	30,44	29,98	30,82
Масса белка, г	42,60±0,37	39,98±0,41	41,99±0,51
Масса белка, % от массы содержимого яйца	69,56	70,00	69,15
Масса скорлупы, г	8,86±0,12	8,56±0,09	8,89±0,11
Масса скорлупы, % от массы яйца	12,64	13,04	12,77
Соотношение массы белка к массе желтка	2,29	2,36	2,24
Толщина скорлупы, мм	0,41±0,050	0,42±0,059	0,42±0,049
Индекс белка	0,24±0,005	0,22±0,008	0,26±0,007
Индекс желтка	2,31±0,058	2,24±0,072	2,33±0,090
Единица ХАУ	90	87	91
Индекс формы	74	73	75

что с повышением уровня яйценоскости у птицы опытных групп произошло снижение массы яйца на 0,9% и 2,3% в первой и второй опытной группе, соответственно.

Соотношение массы белка к массе желтка во второй опытной группе свидетельствует о повышении доли желтка в составе яйца на 1,25% по сравнению с контрольной. Отмечается также увеличение массы скорлупы благодаря повышению ее толщины у кур второй опытной группы на 0,34% по сравнению с контрольной группой. У кур-несушек второй опытной группы, имеющих в составе комбикорма 4,8% фитодобавки из астрагала нутового, произошло повышение удельного веса желтка в составе яйца, повышение толщины скорлупы и единиц ХАУ, то есть улучшение инкубационных и товарных качеств.

Заключение

Скармливание курам-несушкам кормовой фитодобавки из астрагала нуто-

вого, в количестве 3,6% и 4,8% от массы основного рациона, способствовало нормализации морфологических и биохимических показателей крови птицы и повышению основных показателей продуктивности птицы. Отмечена тенденция к увеличению общего белка в плазме крови на 2,9% и 8,8% ($P \geq 0,95$), что повысило интенсивность белкового обмена по сравнению с контрольной птицей и повышению выхода яичной массы из расчета на среднюю несушку в первой и второй опытных группах, соответственно на 1,88% и 2,75%, по сравнению с контрольной.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о положительном влиянии кормовой фитодобавки из астрагала нутового на обмен веществ и яичную продуктивность кур-несушек кросса ЛОМАН БРАУН-ЛАЙТ в условиях Пермского края и возможности использования данной культуры для кормовых целей в птицеводстве.

Библиографический список

1. Абилжанов, Д.Т. Определение качества витаминно-травяной муки из листовой части трав / Д.Т. Абилжанов, Ы.Д. Осмонов // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2018. – № 4. – С. 32–37.
2. Васильева Н. Травяная мука для несушек // Животноводство России. – 2019. – № 53. – С. 21–22.

3. Ветеринарная гематология / Г.А. Симонян [и др.]. – М.: Колос. 1995. – 256 с.
4. *Имангулов Ш.А.* Научные основы кормления и содержания сельскохозяйственной птицы / Ш.А. Имангулов, Т.М. Околелова. – М.: Издательский Центр РИОР. – 2021. – 439 с.
5. Методическое руководство по кормлению сельскохозяйственной птицы / И.А. Егоров, В.А. Манукян, Т.М. Околелова, Т.Н. Ленкова и др. – Сергиев Посад: ФГБНУ ВНИТИП. – 2015. – 119 с.
6. *Овсянников А.И.* Основы опытного дела. – М.: Колос. – 1976. – 304 с.
7. *Плохинский Н.А.* Биометрия. – М.: Изд-во МГУ. – 1970. – 367 с.
8. Руководство по содержанию несушки ЛОМАНН БРАУН – ЛАЙТ. – LOMANN TIERZUCHT. – 42 с.
9. *Фисинин В.И.* Оценка качества кормов, органов, тканей, яиц и мяса птицы: методическое руководство для зоотехнических лабораторий / под ред. В.И. Фисинина. – Сергиев посад. – 1999. – 68 с.
10. *Todorova V., Ivanov K., Ivanova S.* Comparison between the Biological Active Compounds in Plants with Adaptogenic Properties (*Rhaponticum carthamoides*, *Lepidium meyenii*, *Eleutherococcus senticosus* and *Panax ginseng* // *Plants*. – 2022. – Vol. 11 (1). – P. 64.
11. *Samoilova Z., Smirnova G., Bezmaternykh K., Tyulenev A., Muzyka N., Voloshin V., Maysak G., Oktyabrsky O.* Study of antioxidant activity of fodder grasses using microbial test systems // *J Appl Microbiol*. – 2022 – Vol. 132 (4). – P. 3017–3027.
12. *Yang L., Han X., Xing F., Wu H., Shi H., Huang F., Xu Q., Wu X.* Total flavonoids of astragalus attenuates experimental autoimmune encephalomyelitis by suppressing the activation and inflammatory responses of microglia via JNK/AKT/NFκB signaling pathway. *Phytomedicine*. 2021.

**EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ASTRAGALUS CHICKPEAS
PHYTOADDITIVES AS PART OF THE DIET FOR FARMED POULTRY**

Zhdanova I.N., Morozkov N.A., Sukhanova E.V.

Perm Scientific Research Institute of Agriculture

For citation:

Zhdanova I.N., Morozkov N.A., Sukhanova E.V. Evaluation of the effectiveness of Astragalus chickpeas phytoadditives as part of the diet for farmed poultry // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2024. – № 1. – P. 33–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.3>

The article presents the main results of feeding phytoadditive of Astragalus chickpea to egg-laying poultry in order to improve metabolic processes and increase productivity. The research was carried out in 2022 at the Perm Research Institute of Agriculture, Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The fundamental task of agriculture in Russia is to increase the volumes of livestock production. The use of supplements consisting of local plant resources, such as Astragalus chickpea feed supplement, which has a high content of various biologically active substances, may be a good option for providing the necessary nutrients to poultry.

The tested feed phytoadditive has a positive effect on indicators such as egg production, egg laying intensity, egg weight, amount of carotenoids and egg shell thickness. The study is aimed at the possibility of including a feed additive in the composition of poultry feed under conditions of intensified production. When introducing a phytonutrient feed additive into the main diet of laying hens, the following results were obtained: the ratio of protein mass to yolk mass in the second experimental group indicates an increase in the proportion of yolk in the egg composition by 1.25% compared to the control group, a higher content of carotene in the feed mixture, which affected its content in eggs (by 1.9% and 7.0%, respectively, compared to the control group). An increase in shell weight was noted due to an increase in its thickness by 0,34% in eggs from chickens of the second experimental group compared to the control group.

Keywords: medicinal plants, biologically active substances, feed production, feed phytoadditive, poultry, immunomodulators, phytopharmacology.

Сведения об авторах

Жданова Ирина Николаевна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («Пермский НИИСХ»), 614532, Пермский край, Пермский район, с. Лобаново, ул. Культуры, 12; e-mail: saratov_perm@mail.ru

Морозков Николай Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов, «Пермский НИИСХ»; e-mail: pniish@rambler.ru

Суханова Елена Валерьевна, старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов, «Пермский НИИСХ»; e-mail: pniish@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 23.01.2024 г.

ВЛИЯНИЕ 20-ГИДРОКСИЭКДИЗОНА НА МЕДОНОСНУЮ ПЧЕЛУ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО СТРЕССА *

Н.В. Авдеев, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Для цитирования:

Авдеев Н.В. Влияние 20-гидроксиэкдизона на медоносную пчелу в условиях теплового стресса // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 41–45. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.4>

С целью выявления потенциальной опасности для медоносной пчелы, используемой на опылении левзеи сафлоровидной, проведено исследование влияния 20-гидроксиэкдизона в концентрации от 10^{-10} моль/л до 10^{-7} моль/л в сахарном сиропе на продолжительность жизни и двигательную активность рабочих особей в условиях экстремально высокой температуры (50°C). Добавка в корм 20Е оказывает влияние на продолжительность жизни в условиях гипертермии, вероятно, за счет транспорта воды из медового зобика и ректума в гемолимфу, а также на развитие стресс-реакции. Выявлена не линейная, не монотонная зависимость. Сделано предположение, что при потреблении корма с 2×10^{-9} моль/л 20Е происходит активация ферментного окисления 20Е, которая обуславливает снижение титра 20Е в гемолимфе и наблюдаемую смену знака эффекта.

Ключевые слова: 20-гидроксиэкдизон, медоносная пчела, стресс, гипертермия, продолжительность жизни.

Введение

Левзея сафлоровидная является одним из немногих растений с высоким содержанием экидистероидов, достигающих концентрации 1,5% [1], главным образом 20-гидроксиэкдизона (20Е, рис. 1), как в вегетативных, так и в генеративных органах растения. Считается, что накопление этого вторичного метаболита является адапта-

цией растений против растительноядных насекомых [2, 3]. Нектар левзеи может содержать порядка 10^{-3} моль/л 20Е, такое его количество обнаружено в пади из флоэмого сока схожего по содержанию 20Е вида растений [4]. При этом левзея сафлоровидная облигатное ксеногамное энтомофильное растение, опыляемое, в том числе, медоносной пчелой.

* Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации темы № 122030400198-6 «Поиск, изучение генетических источников и доноров хозяйственно-ценных признаков многолетних кормовых трав с разработкой научных основ технологий возделывания и использования экономически значимых для регионов Нечерноземья видов и сортов сельскохозяйственных культур, в том числе, обладающих биологической активностью».

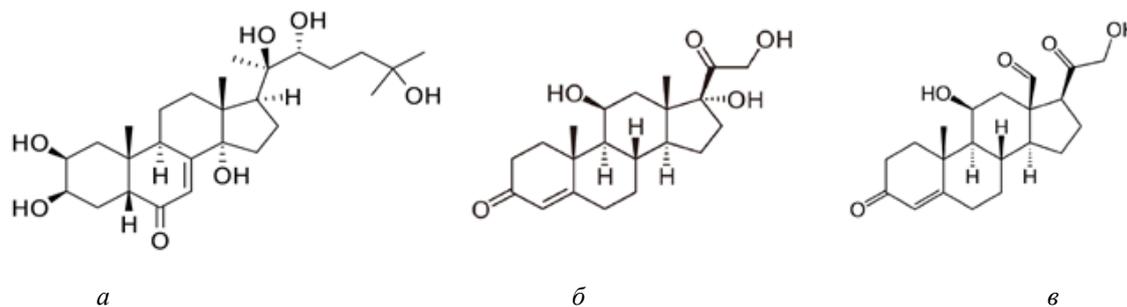


Рис. 1. а – 20Е; б – кортизол; в – альдостерон

Прежде всего, 20Е известен в качестве гормона линьки, достигающего пиковых значений перед линьками и метаморфозом. Однако у взрослых насекомых 20Е выполняет роль гормона стресса, подобно структурно схожим с ним глюкокортикоидам млекопитающих [5, 6]. В последнее время появляются данные, что 20Е принимает участие в регулировании водно-солевого обмена насекомых подобно минералокортикоидам. Так, низкая относительная влажность воздуха, сопровождаемая обезвоживанием тела дрозофилы, приводит к синтезу 20Е в мальпигиевых сосудах, органе выделения и осморегулирования [7]. Экспрессия гена рецептора 20Е (*DopEcR*) отмечена в перикардиальных нефроцитах [8]. Более того, перикардиальные нефроциты дрозофилы чувствительны не только к 20Е, но минералокортикоиду альдостерону, и предложены в качестве модели изучения почек человека [8, 9].

Представляется чрезвычайно интересным исследование последствий поступления с пищей экзогенного 20Е на развитие стресс-реакции и водный обмен пчел с целью выявления потенциальной опасности для медоносной пчелы, используемой на опылении левзеи сафлоровидной.

В качестве предмета исследования была выбрана продолжительность жизни и двигательная активность индивидуально изолированных пчел в условиях экстремально высокой температуры. Тепловой стресс вызывает изменения двигательной активности, которая в ходе развития стресс-реакции имеет различия у пчел разных рас, может модифицироваться некоторыми химическими веществами и коррелирует с активностью связанных со

стрессом ферментов [10, 11]. Продолжительность жизни пчел в условиях воздействия высокой температуры зависит от возможности транспорта воды из медового зобика и ректума для охлаждения тела [12, 13]. В начальный период гипертермии для охлаждения пчелы расходуют воду, содержащуюся в теле (гемолимфе), а затем – находящуюся в медовом зобике и ректуме. Так, экспозиция 120 мин. при 45°C приводит к снижению содержания воды в ректуме на (0,6±0,2)%, 240 мин. – (2,5±0,4)%, 360 мин. – (5,4±2,0)% [12].

Методика исследования

В работе использовали медоносных пчел местной популяции *Apis mellifera mellifera*. Исследовали летнюю генерацию рабочих особей в возрасте (7,5±0,5) суток из мини семьи (примерно 2000 особей с плодной маткой и свободным облетом) в начале июля, а также осеннюю генерацию в ходе зимовки.

Опытные и контрольные группы пчел по 75–100 особей предварительно содержали в течение 24 или 72 часов при 20–25°C в энтомологических садках со свободным доступом к кормушкам с 50% сахарным сиропом с добавлением от 1×10^{-10} моль/л до 1×10^{-7} моль/л 20Е (стандартный образец ООО «Геофарма»), или без 20Е (контроль). Условия опыта, конструкция клетки и кормушки выполнены с учетом рекомендаций [14, 15]. 20Е предварительно растворяли в этаноле, все сиропы, в том числе контрольный, содержали 0,1% объемных спирта. Тепловой стресс оценивали на индивидуально изолированных пчелах в пластиковых пробирках 2,5 мл при температуре

(50 ± 1)°C и относительной влажности воздуха (20 ± 1)%. Пробирка закрывалась ватной пробкой, в дне вырезалось вентиляционное отверстие диаметром 3 мм. Регистрировали наступление фазы гиперактивности, гипоактивности, их чередования и гибели по локомоторной активности и дыхательным движениям с интервалом 5 минут.

Результаты

Полученные результаты не имеют существенных отличий в зависимости от сезона и продолжительности приема корма с 20E и представлены на рис. 2 на примере пчел летней генерации, получавших исследуемый корм 24 часа.

Прежде всего, выделяется аномальная концентрация 20E в сахарном сиропе

2×10^{-9} моль/л, которая дает 1,6–1,7 кратное падение продолжительности жизни, а также более поздний переход пчел в состояние повышенной двигательной активности. В то же время, при добавлении 20E в корм меньшего количества – 20E (4×10^{-10} моль/л) – оно способствовало увеличению продолжительности жизни пчел в 1,1 раза. Во время зимовки также было отмечено чуть меньшее, но достоверное увеличение продолжительности жизни при еще меньшей концентрации (1×10^{-10} моль/л). Показатели при максимальной исследованной концентрации (1×10^{-7} моль/л) 20E возвращаются к уровню контроля, а продолжительность жизни за счет стадии гипоактивности в целом превышает контроль, но из-за высокой вариабельности разность недостоверна.

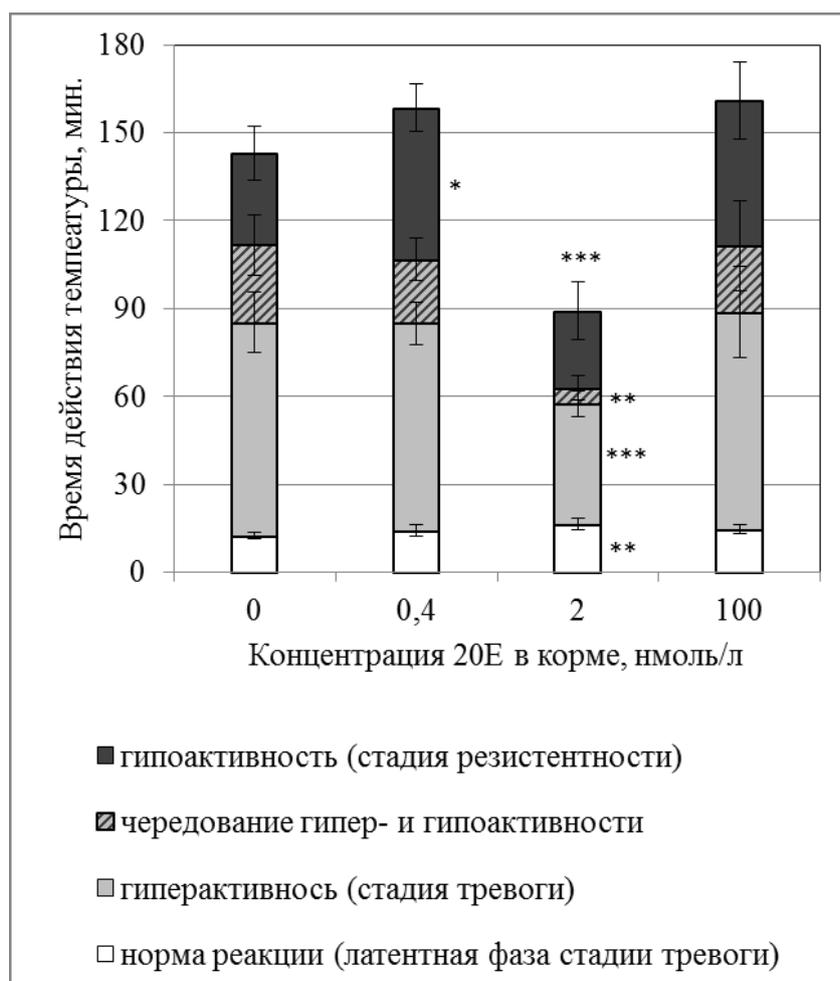


Рис. 2. Изменение стереотипа двигательных реакций и продолжительность жизни в условиях температурного стресса пчёл, предварительно получавших сахарный сироп (контроль) и сахарный сироп с 20E, ($M \pm sem$), * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$ к контролю

Обсуждение

Увеличение продолжительности жизни и, особенно, увеличение стадии гипоактивности (резистентности) при употреблении низких концентраций 20E может быть обусловлено положительным влиянием 20E на транспорт воды из медового зобика и ректума, поскольку именно к концу летальной экспозиции гипертермии увеличивается резорбция воды из медового зобика и ректума [12].

Резкое падение продолжительности жизни и начальная заторможенная реакция на температурный стресс при употреблении сиропа с 2×10^{-9} моль/л 20E могут быть спровоцированы активацией метаболизма 20E, что приводит к окислению как экзогенного, так и эндогенного 20E в гемолимфе ниже фонового уровня. Таким образом, эффекты аномальной концентрации 20E (2×10^{-9} моль/л) вызваны понижением уровня 20E в гемолимфе. Но система метаболизма не справляется с высоким количеством экзогенного 20E, что приводит к повышению выживаемости и ее высокой вариабельности. Данное предположение требует подтверждения изучением экспрессии генов, участвующих в метаболизме 20E, и определением титра 20E в гемолим-

фе. Может быть и другое объяснение смене знака эффекта при повышении дозы 20E. Так, синтез протеина миоцитами постепенно увеличивался с повышением концентрации 20E в культуральной жидкости до 5 мкмоль/л, но резко падал до исходного при более высокой концентрации 20E (10 мкмоль/л) [16].

Выводы

Продолжительность жизни и двигательная активность в условиях гипертермии – чувствительный (2×10^{-9} моль/л) и доступный способ оценки влияния 20E на медоносную пчелу.

Добавка в корм 20E пчел оказывает существенное влияние на развитие стресс-реакции и продолжительность жизни в условиях гипертермии. Последнее, вероятно, обусловлено влиянием 20E на транспорт воды через стенку медового зобика и ректума в гемолимфу.

Низкая доза 20E в корме (4×10^{-10} моль/л) стимулирует устойчивость пчел к воздействию высокой температуры, что вызывает интерес к использованию экстракта левзеи в пчеловодстве для защиты пчел при их обработке в термокамере от клеща *Varroa destructor*.

Библиографический список

1. Тимофеев Н. П., Володин В.В., Фролов Ю.М. Распределение 20-гидроксиэкдизона в структуре биомассы надземной части *Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Pjin в условиях агроценоза (республики Коми)// Растительные ресурсы. – 1998. – т. 34. – № 3. – С. 63–69.
2. Дайнен Л. Стратегия оценки роли фитоэкдистероидов как детеррентов по отношению к беспозвоночным-фитофагам // Физиология растений. – 1998. – Т. 45. – № 3. – С. 347–359.
3. Уфимцев К.Г., Ширинова Т.И., Володин В.В. Фитоэкдистероиды как детерренты насекомых-фитофагов: действие растения серпухи венценосной *Serratula coronata* L. – продуцента экдистероидов, на египетскую хлопковую совку *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuida)// Успехи современной биологии. – 2009. – Т. 129. – № 3. – С. 1–15.
4. Пестов С.В., Филиппов Н.И., Уфимцев К.Г., Володин В.В. Взаимоотношения насекомых с интродуцированными растениями (на примере видов рода *Serratula*) // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. Книга 1. – Киров: ООО «Веси», 2014. – С. 195–198. doi:10.13140/RG.2.1.3654.0964.
5. Еремина М.А., Груntenко Н.Е. Нейроэндокринная стресс-реакция насекомых: история развития концепции// Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2017. –Т. 21. – № 7. – С. 825–832. doi: 10.18699/VJ17.302.
6. Petruccelli E., Lark A., Mrkvicka J.A., Kitamoto T. Significance of DopEcR, a Gprotein coupled dopamine/ecdysteroid receptor, in physiological and behavioral response to stressors// J. Neurogenet. – 2020. – Vol. 34. – № 1. – P. 55–68. doi: 10.1080/01677063.2019.1710144.
7. Zheng W., Rus F., Hernandez A., Kang P., Goldman W., Silverman N. Dehydration triggers ecdysone-mediated recognition-protein priming and elevated anti-bacterial immune responses in *Drosophila* Malpighian tubule renal cells // BMC Bio. – 2018. – Vol. 16. – № 60. doi: 10.1186/s12915-018-0532-5.

8. Zheng W., Ocorr K., Tatar M. Extra-cellular matrix induced by steroids through a G-protein coupled receptor in a Drosophila model of renal fibrosis // bioRxiv. – 2019. – P. 653329. doi: <https://doi.org/10.1101/653329>.
9. Dow J.A.T., Simons M., Romero M.F. Drosophila melanogaster: a simple genetic model of kidney structure, function and disease // Nat Rev Nephrol. – 2022. – Vol. 7. – P. 417–434. doi: [10.1038/s41581-022-00561-4](https://doi.org/10.1038/s41581-022-00561-4).
10. Салтыкова Е.С., Беньковская Г.В., Николенко Ф.Г. Внутривидовые различия в механизмах формирования защитных процессов у медоносной пчелы *Apis mellifera* // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2007. – Т. 43. – № 2. – P. 162–167.
11. Беньковская Г.В., Салтыкова Е.С., Поскряков А.В., Николенко А.Г. Влияние хитосахаридов на биохимические процессы медоносной пчелы при экстремально высокой и низкой температурах // Агрехимия. – 2002. – Т. 3. – С. 62–66.
12. Еськов Е.К. Морфофизиологические и этологические эффекты гипер- и гипотермии медоносной пчелы // Успехи современной биологии. – 2014. – Т. 134. – № 6. – С. 588–605.
13. Еськов Е.К. Экзо- и эндогенная вода в теле медоносной пчелы (*Apis mellifera*, Hymenoptera, Apidae) // Зоологический журнал. – 2018. – Т. 97. – С. 151–160. doi: [10.7868/S0044513418020046](https://doi.org/10.7868/S0044513418020046).
14. Bosua H.J., Nicolson S.W., Archer C.R., Pirk C.W.W. Effects of cage volume and bee density on survival and nutrient intake of honeybees (*Apis mellifera* L.) under laboratory conditions // Apidologie. – 2018. – Vol. 49. – P. 734–746. doi: [10.1007/s13592-018-0595-x](https://doi.org/10.1007/s13592-018-0595-x).
15. Williams G.R., Alaux C., Costa C., Csáki T., Doublet V., Eisenhardt D., Fries I., Kuhn R., McMahon D.P., Medrzycki P., Murray T.E., Natsopoulou M.E., Neumann R., Oliver R., Paxton R.J., Pernal S.F., Shutler D., Tanner G., van der Steen J.J.M., Brodschneider R. Standard methods for maintaining adult *Apis mellifera* in cages under in vitro laboratory conditions // Journal of Apicultural Research. – 2013. – Vol. 52. – № 1. – P. 1–36. doi: [10.3896/IBRA.1.52.1.04](https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.04).
16. Lafont R., Serova M., Didry-Barca B., Raynal S., Guibout L., Dinan L., Veillet S., Latil M., Dioh W., Dilda P. 20-Hydroxyecdysone activates the protective arm of the RAAS via Mas receptor // BioRxiv. – 2020. doi: [10.1101/2020.04.08.032607](https://doi.org/10.1101/2020.04.08.032607).

INFLUENCE OF 20-HYDROXYECDYZONE ON THE HONEY BEE UNDER HEAT STRESS

Avdeev N.V.

Perm Scientific Research Institute of Agriculture

For citation:

Avdeev N.V. Influence of 20-hydroxyecdysone on the honey bee under heat stress // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 1. – P. 41–45. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.4>

In order to identify the potential danger for the honey bee used for pollination of *Leuzea safflower*, a study was carried out of the effect of 20-hydroxyecdysone at a concentration of 10^{-10} M to 10^{-7} M in sugar syrup on life expectancy and motor activity of worker bees under extremely high temperatures (50°C). The addition of 20E to the feed has an effect on survival time under conditions of hyperthermia, probably due to the transport of water from the honey goiter and rectum to the hemolymph, as well as on the development of the stress response. A non-linear, non-monotonic relationship was found out. It has been suggested that when consuming food with 2×10^{-9} M 20E, the enzymatic oxidation of 20E is activated, which causes a decrease in the 20E titer in the hemolymph and the observed change in the sign of the effect.

Keywords: 20-hydroxyecdysone, honey bee, stress, hyperthermia, survival time.

Сведения об авторе

Авдеев Николай Викторович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биологически активных кормов, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («Пермский НИИСХ»), 614532, Пермский край, Пермский район, с. Лобаново, ул. Культуры, 12; e-mail: saratov_perm@mail.ru

Материал поступил в редакцию 01.12.2023 г.

ПОРТРЕТ УЧЕНОГО



АКАДЕМИК АН ЛАТВИИ
КИРКО ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ
(16.04.1918 – 26.11.2007)

П.Г. Фрик, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

С.Ю. Хрипченко, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Фрик П.Г., Хрипченко С.Ю. Академик АН Латвии Кирко Игорь Михайлович (16.04.1918–26.11.2007) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 47–55. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.5>

Родился в г. Бежице Брянской области. Окончил Московский университет в 1941 году, доктор физико-математических наук (1959), академик АН Латвии (1966), а с 1992 года – иностранный член Академии наук Латвии. В 1948–67 годах – директор Института физики АН Латвии, с 1972 года – заведующий лабораторией физической гидродинамики Института механики сплошных сред УНЦ АН СССР (Пермь).



*Кирко Игорь Михайлович
(16.04.1918–26.11.2007)*

Член Президиума Уральского научного центра АН СССР с 1977 по 1986 годы. С 1987 года – заведующий отделом магнитной динамики в Уральском филиале Института машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР. С 1990 года – директор кооперативного Института физических проблем технологий (Пермь).

И.М. Кирко постоянно вел педагогическую работу: с 1950 по 1972 гг. преподавал в Латвийском государственном университете, а с 1973 года – был профессором кафедры общей физики Пермского государственного университета.

В 1972 году, будучи студентами физфака Пермского госуниверситета, мы узнали, что к нам в Пермь приехал из Латвии академик, и он будет работать у нас в создаваемом в Перми научном центре. Было очень интересно послушать его выступление на городском гидродинамическом семинаре, руководимом Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицким, о такой неизвестной и интересной науке, как магнитная гидродинамика. Была еще встреча с нами, студентами физического факультета, на Пермском телевидении, где мы узнали от академика о важных прикладных аспектах магнитной гидродинамики. После этих встреч возникло большое желание рабо-

тать в этой области и с этим ученым, что в конечном итоге после окончания университета и произошло.

Приезд в Пермь И.М. Кирко взбудоражил не только студентов, но и всю научную общественность Перми, так как ученых с академическими титулами в то время в городе не было. Об Игоре Михайловиче Кирко было известно, что ему принадлежит ведущая роль в становлении и развитии магнитной гидродинамики в СССР. Именно эти его работы отмечены в библиографическом справочнике «Физики» (автор Ю.А. Храмов, Наука, 1983), в котором его портрет размещен между портретами Дж. Кирквуда и Г. Кирхгофа.

Библиографические данные, которые приведены в самом начале, отмечают только годы определенных этапов жизни и, конечно, практически ничего не говорят о том, каким он был человеком и каким был ученым.

О периоде жизни и работы в Латвии, пожалуй, главном периоде в своей жизни, о том, как начинались и развивались исследования по МГД, лучше всего может рассказать сам Игорь Михайлович.

КАК НАЧИНАЛИСЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ В РИГЕ (неопубликованные воспоминания И.М. Кирко)

Один мудрец, то ли Гегель, то ли Энгельс, сказал, что практические потребности двигают науку быстрее, чем десятки университетов...

Конечно, это утверждение должно быть дополнено тезисом, что без университетов и, вообще, хорошей высшей школы, двигать эту науку будет некому.

Я – сравнительно молодой, тридцатилетний кандидат наук – возглавил в 1948 году Институт физики Академии наук Латвии и усиленно искал актуальную тематику для физического института. Сам я занимался до этого магнитной динамикой – переменными процессами в ферромагнитных телах. Все это было хорошо для индивидуальных занятий, но для ака-

демического института – очень обыденно, тем более, что в этой области были широко известные ученые – В.К. Аркадьев, К.М. Поливанов, Я.Б. Дорфман и др., работающие в МГУ, в МЭИ, в Ленинградском университете и в других научных и учебных заведениях.

Мой заместитель Иван Андреевич Тютин однажды принес свежий английский журнал и показал мне фотографию индукционного электромагнитного насоса, который работает без клапанов и поршней. Я никогда не слышал о такой возможности. Мы сразу, «для интереса», поставили опыт: в бутылку налили немного ртути и поместили ее в статор асинхронного двигателя. Мы увидели явление, которое показалось мне чудом: ртуть закрутилась в бутылке и ее поверхность превратилась в параболическое зеркало.

В те далекие времена наука была строго централизована: я в скором времени рассказал о нашем опыте академику Льву Андреевичу Арцимовичу – он был наш непосредственный начальник по научной линии в Москве и занимал пост академика-секретаря Отделения физики и астрономии. Сам Л.А. Арцимович работал над проблемой термоядерного синтеза, но это держалось тогда в очень большом секрете. После моего рассказа Лев Андреевич крайне оживился и высказал желание заняться этой новой тематикой и дал указание о выделении молодому Институту физики в Латвии 10 штатных единиц для начала работ, а финансирование увеличить порекомендовал за счет договоров. Само выделение 10 единиц при существовавшем тогда штате всего в 30 единиц было серьезным «дипломатическим» успехом неопытного директора.

Трудность заключалась в том, что не было подготовленных кадров не только в области магнитной гидродинамики, но и в гидродинамике вообще. Не было даже людей, изучавших гидродинамику. Я сам окончил физический факультет Московского государственного университета, специализируясь по теоретическим основам электротехники. Гидродинамику

нам «давали» только в курсе общей физики в виде закона Бернулли и понятия, что существует турбулентное течение и число Рейнольдса, которое определяет переход в это состояние. Правда, экспериментов показывали много, начиная с такого, что два листочка бумаги прижимаются друг к другу, если между ними подуть, а шарик от пинг-понга «парит» и «пляшет» в струе воздуха.

Надо было набирать способную молодежь, ее учить гидродинамике, самому учиться...

На полученные «штаты» была направлена по распределению в Институт физики Латвийской Академии наук группа способных молодых людей, окончивших Латвийский университет и политехнический институт: О. Лиелаусис, Я. Лиелпетер, Р. Калнин, А. Калнин, А. Микельсон. Были привлечены также более «старшие» физики и инженеры – Ю. Круминь, Ю. Бирзвалк.

Гидродинамику, а особенно магнитную гидродинамику, не изучал из «новобранцев» никто. Чтобы решить эту проблему, я отправился в Ленинград (ныне С.-Петербург) в Ленинградский политехнический институт к известному ученому-гидродинамику Льву Герасимовичу Лойцянскому с просьбой проконсультировать нас, посоветовать – как быть? Лев Герасимович совершенно бескорыстно согласился проконсультировать нас, а по вопросу о кадрах сказал следующее:

– У меня есть ученик, Герман Брановер, человек исключительных способностей и культуры. На днях он защищал кандидатскую диссертацию, очень хорошую работу, но наш Ученый совет тайным голосованием, без видимых причин, ее «завалил». Причина мне не понятна: то ли из-за антисемитских настроений, то ли месть мне.

– И что делает сейчас Ваш ученик?

– Он заявил, что бросает науку, и уехал к родственникам в Ригу.

– Дайте мне его адрес, я попробую поговорить.

В Риге мы нашли Г. Брановера, на предложение заниматься МГД он наотрез отказался, но согласился участвовать в семинарах по МГД, которые мы стали проводить еженедельно и которые являлись на первых порах формой нашей учебы. На этих семинарах никто не стеснялся друг друга, ни директор, ни сотрудники не скрывали своего невежества, но все упорно учились. Стали строить примитивные МГД-насосы на ртуть в нашей маленькой мастерской.

Академик Л.А. Арцимович сообщил мне, что на заводе «ЭЛЕКТРОСИЛА» в Ленинграде работает лаборатория, которой руководят А.П. Комар и В.А. Глухих. Он дал мне указание установить с ними контакт. Я отправился в Ленинград с «открытыми картами», рассказал о наших первых шагах по созданию кондукционных МГД-насосов, воспроизводя известные опыты Гартмана. В ответ мне сказали, что это очень интересно, но ленинградская лаборатория уже создала индукционный насос, который работает от трехфазной сети. Задачи же, которые ставили мы, более глубокие. Мы исследовали переход от ламинарного течения к турбулентному, могли уже рассчитывать коэффициент сопротивления и влияние на него электромагнитного поля. Это сообщение вызвало интерес и просьбу изложить его более подробно по секретной почте.

– Зачем по секретной почте! Мы готовим к печати наш первый сборник по МГД.

– Как к печати? Ведь есть секретный правительственный перечень, где исследования по МГД не подлежат публикации.

– А я получил разрешение на публикацию.

– Ну, Вам в прыти не откажешь...

Так началась дружба-соперничество двух исследовательских групп – рижской и ленинградской.

Становление научных сотрудников...

Команда или коллектив работающих в магнитной гидродинамике быстро рос, во-первых, благодаря увеличению штатов Института, во-вторых, благодаря закры-

тию некоторых лабораторий, которыми руководили совместители. Закрылась и моя лаборатория ферромагнетизма, по моей инициативе. В Институте устанавливалась потихонечку дисциплина: обязательная работа в лаборатории или библиотеке, наличие рабочих мест у каждого сотрудника. Это обстоятельство было очень важным, так как было распространено мнение, что академический институт – это некоторая «синекура» для избранных и являться туда надо только для встреч и по приглашению начальства. Установление жесткого порядка «работы на работе» многим совместителям не понравилось, и они «освободили штатные места».

При подборе кадров важно было не ошибиться: здесь помогли ученые Латвийского Университета своими рекомендациями способных и работоспособных абитуриентов, как заканчивающих Университет и Политехнический институт, так и работающих уже в школе и на производстве. Кроме того, был применен «секретный» прием, которому меня научил академик Абрам Федорович Иоффе, директор Физико-технического института АН СССР в Ленинграде, который шефствовал над нашим Институтом и много помогал мне, в сущности, неопытному руководителю. А.Ф. Иоффе рекомендовал в начале каждого года при утверждении бюджета и штатов Института сокращать штат на 10–15%. Это служило юридическим основанием для избавления от бесперспективных работников без особого шума. (Попробуйте доказать какому-либо научному работнику, что у него «нет перспектив». Вы наживете себе смертельного врага, Вас высмеют на заседании профкома и «потянут» объясняться выше за самоуправство. Другое дело, когда надо, нет штатных мест, а сокращать способных людей я не согласен, так как они заняты на выполнении правилительственных постановлений по МГД, а потом и по атомному реактору, который мы начали строить).

Наступил май, выпуск из вузов – президент Академии возвращал без шума отобранные штатные единицы, и мы вливали свежие силы в коллектив.

Система информации...

Каждый научный сотрудник, работающий над определенной проблемой магнитной гидродинамики и физики процессов в атомном реакторе, обязан был ежемесячно докладывать семинару своей лаборатории о статьях и патентах, которые были обнаружены в текущей литературе и в старых журналах, если эти вопросы были неизвестны. Таким образом обеспечивался непрерывный приток информации и ее обработка в кругу заинтересованных людей.

По совету А.Ф. Иоффе, я придерживался правила: академическая лаборатория не должна превышать 10–15 человек, но иметь общее для всех направление – тему. Из них одна треть – вспомогательный персонал.

Как только возникало самостоятельное направление, я старался выделить его в отдельную группу. Так долгие годы существовала группа-лаборатория Ю. Бирзвалка – бессменного редактора журнала «Магнитная гидродинамика», учрежденного при Институте. Его лаборатория специализировалась на теории и эксперименте кондукционных электромагнитных насосов. Она установила тесное взаимодействие с академиком АН Эстонии, профессором Ленинградского электротехнического института В.И. Вольдеком. Были созданы методы оптимального проектирования этого вида машин. Ю. Бирзвалк написал монографию, которая до сих пор используется как полезное руководство для расчета и проектирования этого вида машин. Следует отметить высокую общую культуру этого человека. Его «хобби» было литературоведение. Он фактически стал специалистом-шекспироведом, вел переписку с английскими учеными в этой области и выдвигал свои гипотезы о великой неразгаданной тайне: кто был Шекспир? В частности, он провел тщательный анализ всех сонетов Шекспира и нашел поразительное совпадение их тем и мотивов с биографией известной в то время исторической личности – лорда Эссекса.

В прикладной магнитной гидродинамике так же, как в учении об электрических машинах, выделяются линейные индукци-

онные машины с бегущим магнитным полем – аналоги асинхронных двигателей. На разработку конструкций этих машин мы одновременно получили заказы от профессора Мельникова Михаила Васильевича, возглавлявшего энергетический отдел предприятия А.П. Королева, и от профессора Севрука Доменика Домениковича – руководителя фирмы Госкомитета по атомной энергии. Все они считали целесообразным переход на жидкометаллический теплоноситель в атомных реакторах космических кораблей. Таким образом, надо было переходить на «рабочее тело» в виде жидкого натрия и даже лития. Главатом был заинтересован в создании новых насосов для реакторов на быстрых нейтронах, в которых утилизировался уран-238, превращающийся в плутоний.

Во главе лаборатории индукционных МГД машин стал Ян Лиелпетер, будущий академик АН Латвии и президент этой Академии. Я. Лиелпетер показал себя как человек сильного характера с молодых лет. После того, как по окончании университета по моему ходатайству он был направлен в Институт физики Латв. АН, он появился в моем кабинете и заявил, что не хочет работать под моим руководством, а желает работать под руководством академика Лидии Карловны Лиепиня – известного физика-химика, одного из крупнейших специалистов в области коррозии металлов. Меня это заявление разозлило, и я сказал ему что-то на тему песенки: «Ах, попалась птичка – стой, не уйдешь из клетки...» То есть без согласия нашего Института уйти нельзя: по распределению он должен был отработать два или три года, а потом – на все четыре стороны. На этом наш «конфликт» окончился, и Я. Лиелпетер показал себя активным и способным исследователем.

Было установлено взаимодействие с крупным специалистом в области электрических машин профессором Штурманом, поставлен целый ряд экспериментальных и теоретических работ по применимости положений теории электрических машин к линейным индукционным насосам. В частно-

сти, были исследованы так называемые коэффициенты ослабления, вызванные обратным влиянием потока жидкого металла на конфигурацию линий тока и распределение магнитного поля. Особенный интерес представили экспериментальные исследования краевых эффектов на входе и выходе жидкого металла из насоса. Здесь сказалось сильное влияние магнитного числа Рейнольдса и безразмерного параметра, определяющего влияние концевых эффектов. Я.Я. Лиелпетер построил установку – кольцевой электромагнитный канал, то есть индукционный насос без концевых эффектов и его аналог – линейный насос с входом и выходом, с оригинальной системой подвеса корпуса, позволяющей очень точно установить динамическое взаимодействие между «рабочим телом», то есть текущим жидким металлом, и собственно корпусом насоса. Была создана достаточно точная методика расчета такого типа насосов, опирающаяся не только на теорию, но и на многочисленные эксперименты. Наш Институт был одним из первых научных учреждений в СССР, который начал работать с литием – очень опасным металлом...

Особое внимание мы уделяли конструкторской группе и мастерским, штаты для которых мне удалось получить простым способом. Институт находился не в Риге, а в Саласпилсе – небольшом районном центре, недалеко от Риги. По существовавшему тогда порядку, если вовремя, до начала года представить в районный финансовый отдел документы о наличии хозяйственного дохода, то под него можно утвердить штаты мастерской и КБ, причем слесарь 5-го разряда мог получать до 1 600 рублей в месяц, больше зарплаты старшего научного сотрудника без ученой степени. А «доход» мы получали солидный: если государственный бюджет Института долгие годы был в 400 тыс. рублей в год, то по договорам с вышеупомянутыми учеными мы получали до 1,5 млн рублей – их я мог тратить на зарплату мастерской, покупку оборудования, но не имел права платить научным сотрудникам. На эти же деньги мы заключали договора с вузами.

Мы начали быстро строиться, приобретать оборудование, часть оборудования изготавливать сами. Такова была материальная сторона нашего развития.

Но более серьезно стояли вопросы науки, которые надо было решать, чтобы не провалить те обязательства, которые мы на себя взяли. А времена были суровыми: при неудачах или срывах правительственных постановлений директору – об этом прямо говорили, – грозила нешуточная кара...

В этом отношении нашему коллективу значительно повезло – образовалась, как говорят, научная пара – два талантливых ученых, у которых исследование шло особенно интенсивно и глубоко: Герман Брановер и Ольгерт Лиелаусис. Достоинством Г. Брановера также оказалось, что он уже был специалистом в гидродинамике. Вокруг них сложился прекрасный научный коллектив, который «задавал песню» в нашем «походе». Он явился центром организации совещаний по магнитной гидродинамике, которые стали проводить каждые 2 года. Нам разрешили издавать общесоюзный журнал «Магнитная гидродинамика». Коллектив назывался лабораторией МГД, то есть в его задачи входили поиск новых МГД явлений и закономерностей, обязательство быть идеологом других лабораторий и КБ, создающих электромагнитные насосы.

Вокруг Института создавались и учреждались самостоятельные хозрасчетные подразделения: конструкторское бюро (КБ) по магнитной гидродинамике в Риге, которое работало, в основном, по нашим заказам, КБ по конструированию МГД расходомеров, которое разрабатывало новые виды этих приборов, в особенности, для больших расходов натрия.

В чем заключались главные достижения?

1. Создание эмпирической теории турбулентных течений в каналах МГД-машин, получение обобщенных зависимостей, позволяющих поставить расчет МГД машин на научную почву. Эта теория по-

лучила в научном мире краткое наименование «теории средней длины перемешивания в МГД течениях Брановера»

2. Открытие нового явления – сглаживания кривой зависимости коэффициента сопротивления в магнитном поле, когда исчезает разрыв между этой зависимостью при ламинарном и турбулентном течении. На эксперименте было показано явление, когда сопротивление течению в продольном магнитном поле будет меньше сопротивления без поля.

3. Специфика развития пограничного слоя в магнитной гидродинамике, когда его толщина определяется, в основном, так называемым числом Гартмана.

4. А. Цинобер построил «большую карусель», то есть установку для исследования пограничного слоя в скрещенных магнитном и электрическом полях для управления пограничным слоем. А. Гайлитис дал теорию такого типа устройств.

5. Начались исследования альфа-эффекта.

К слову сказать, работы по МГД-динамо, начавшиеся в Риге еще в 60-х годах (знаменитый альфа-бокс), завершились первой успешной реализацией лабораторного динамо в Риге уже в самом конце девяностых годов, а настоящий, «турбулентный» альфа-эффект был впервые реализован в начале 2000-х в Перми.

Вспоминая об Игоре Михайловиче, невозможно не сказать о нескольких эпизодах из его военной и послевоенной жизни, которые говорят о нем как о человеке и как об ученом. Об одних мы узнали из личных бесед с ним, о других рассказали его коллеги из Рижского института физики.

В 1941 году Игорь Михайлович окончил Московский университет, прямо перед началом Великой Отечественной войны. Молодой специалист Игорь Михайлович Кирко в это время работал инженером в Центральном научно-исследовательском институте тяжелого машиностроения. После начала войны, когда враг подошел к столице, молодой человек записался в группу, которая в случае отступления на-

ших войск из Москвы должна была остаться на нелегальном положении и вести борьбу с врагом. К счастью, благодаря стойкости наших солдат, этого не случилось, и Игорь Михайлович продолжал работать в институте, где занимался вопросом размагничивания кораблей военно-морского флота с целью защиты их от магнитных мин вплоть до 1942 года. Начиная с 1942 и по 1944 год, работая в НИИ минометного вооружения, он изобрел прибор обнаружения электризации, который спас многих советских солдат в годы Великой Отечественной войны от поражения электрическим током при форсировании рек и преодолении различных препятствий. Игорь Михайлович гордился своими медалями «За оборону Москвы» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне».

Интересный эпизод рассказал Игорь Михайлович о военных буднях. Время было суровое, стране было тяжело, и в помещениях института было очень холодно. Сотрудники нашли остроумный и необычный выход из этой ситуации. Они время от времени обогревались, берясь за клеммы высокочастотного источника тока. При большой частоте электрический ток течет в тонком поверхностном слое кожи, не принося вреда организму в целом, лишь слегка нагревая поверхностный слой.

Другие эпизоды, о которых рассказали его коллеги, имели место сразу после войны, когда И.М. Кирко был уже директором Института физики в Саласпилсе.

К нему пришел специалист (М.В. Филипов), который подвергся сталинским репрессиям и вернулся из мест заключения. Его нигде не брали на работу. Игорь Михайлович принял его в штат института, где он впоследствии стал главным редактором журнала «Магнитная гидродинамика», главного в Союзе журнала по этой науке.

Несколько позже Игорь Михайлович со свойственной ему энергией и размахом добился того, что в его институте был построен исследовательский атомный реактор. Естественно, перед его пуском все волновались: ведь дело это – совсем новое, все может быть. Для того чтобы снять у всех

волнение и тем самым обеспечить четкое выполнение всех пусковых действий сотрудниками, Игорь Михайлович поставил стул на крышку реактора, сел на него и спокойно просидел на нем все время пуска.

В 1972 году Игорь Михайлович был приглашен в Пермь, где в это время было создано первое подразделение академии наук – Отдел физики полимеров, преобразованный впоследствии в Институт механики сплошных сред Уральского отделения АН СССР. Руководить этим Отделом, а впоследствии и институтом, был назначен член-корреспондент АН СССР Поздеев Александр Александрович, а Игорь Михайлович Кирко стал руководить лабораторией физической гидродинамики, в которую он со свойственным ему размахом включил группу электродинамики, теоретический сектор, группу экспериментальной гидродинамики, конструкторскую группу, группу, исследующую физические процессы в реакторах восстановления титана, и экспериментальные мастерские. Группа по титану располагалась в г. Березники на Титаномагниево-комбинате (ныне ОАО «АВИСМА»). Возглавлять эту группу Игорь Михайлович пригласил талантливого ученого из Донецка Э.А. Йодко. Впоследствии эти группы уже в Институте превратились в отдельные полноценные лаборатории, а научные публикации сотрудников этих лабораторий хорошо известны как у нас, так и за рубежом.

Сотрудниками созданной Игорем Михайловичем лаборатории были в основном представители молодежи, недавно или только что закончившие вуз, которыми руководили и опекали более зрелые ученые: М.И. Шлиомис, Е.Л. Тарунин, В.Д. Зимин, Э.А. Йодко. Игорь Михайлович регулярно собирал молодых сотрудников, которые докладывали о своей работе, а он рассказывал о новых идеях и перспективных темах и задачах, возникающих в промышленности. Работая с нами, Игорь Михайлович всегда рассказывал о перспективных планах работ и поддерживал инициативу в выборе направления исследований начинающими учеными. Он

считал, что прикладные работы, которые велись в лаборатории, должны быть направлены на конкретные задачи производства, а для этого необходимо знакомиться с условиями производства, для которого решается та или иная прикладная задача. По этой причине мы очень часто ездили в командировки на различные заводы и совместно с сотрудниками заводов производили испытания разрабатываемого нами оборудования или ставили совместно с заводом эксперименты.

Игорь Михайлович считал очень важным обмен мнениями и сотрудничество с другими учеными, научными коллективами и производственными предприятиями. Практически в первые годы работы в Перми он организовал ежемесячный Пермский семинар по Магнитной гидродинамике, на котором регулярно делали доклады известные ученые и еще неопытные исследователи из основных центров Советского союза, где занимались фундаментальными и прикладными вопросами магнитной гидродинамики. Авторитет Игоря Михайловича среди ученых, занимающихся МГД, был очень высок, поэтому с выступлениями на наш семинар приезжали исследователи со всего Союза. Многие молодые ученые считали обязательным перед защитой своей кандидатской или докторской диссертации «обкатать» ее на семинаре Игоря Михайловича. Доклады представляли ученые из Таллина, Риги, Донецка, Киева, Петербурга, Москвы и, конечно, Перми. В то время нам, молодым исследователям, тоже представлялась возможность выступить на этом представительном форуме со своими первыми научными докладами.

Этот семинар был для нас, молодых, хорошей школой, где мы знакомились с новыми идеями и разработками в области МГД. Тематика сообщений на семинаре была очень разнообразной: на нем, например, выступали с докладами по проблеме винтового МГД-динамо (А. Гайлитис), по мелкомасштабному турбулентному динамо (А.А. Рузмайкин), по вопросам литья

металла в электромагнитный кристаллизатор (З.Н. Гецелев) и по проблеме создания МГД-генератора (Е.И. Янтовский). В начале восьмидесятых годов мы познакомились с проблемами реализации идеи атомного ракетного двигателя, работы по созданию которого велись уже в то время.

По приглашению Игоря Михайловича в Пермь приезжал академик Леонид Иванович Седов, который выступил на семинаре с докладом по ключевым проблемам механики, а его заместитель (как директора института механики МГУ) С.С. Григорян сделал доклад о модели Тунгусского метеорита. В свой приезд они посетили нашу лабораторию, где мы имели возможность показать свои эксперименты и рассказать о них. Рассматривая одну из экспериментальных установок, в которой модель для термостатирования была помещена в обычную большую алюминиевую кастрюлю с машинным маслом, Л.И. Седов, обращаясь к Григоряну, пошутил: «Учитесь, как при помощи обычных вещей делать хороший эксперимент, подобно тому, как Фарадей употреблял сургуч и веревку».

И.М. Кирко имел широчайший круг контактов в научных кругах страны и охотно делился своими связями, помогая устанавливать научные контакты молодым сотрудникам. Он сделал нас активными участниками знаменитых Рижских совещаний по магнитной гидродинамике, он способствовал контактам пермской научной молодежи с коллективом Рижского института физики, который был безусловным лидером в области экспериментальной магнитной гидродинамики, и нам было чему поучиться у опытных коллег. Благодаря Игорю Михайловичу появился контакт с группой академика Я.Б. Зельдовича, занимавшейся проблемой космических магнитных полей. Этот контакт со временем перерос в многолетнее плодотворное сотрудничество.

Игорь Михайлович прожил долгую и интересную жизнь, щедро одаривая работавших с ним людей своей энергией и

своими идеями. Созданная им в Перми лаборатория дала начало четырем полноценным лабораториям, успешно работающим в Институте механики сплошных сред

УрО РАН, в которых реализуют свой потенциал сотрудники, работавшие с Игорем Михайловичем, и новые молодые талантливые исследователи.

Сведения об авторах

Фрик Петр Готлобович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, Академика Королева, 1; e-mail: frick@icmm.ru

Хрипченко Станислав Юрьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: khripch@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 13.03.2024 г.

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ ШКЛЯЕВ – ЖИЗНЬ И ГЕТЕРОЦИКЛЫ (28.10.1917 – 10.07.2003)

Ю.В. Шкляев, *Институт технической химии УрО РАН*

Для цитирования:

Шкляев Ю.В. Владимир Сергеевич Шкляев – жизнь и гетероциклы (28.10.1917 – 10.07.2003) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 56–59. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.6>

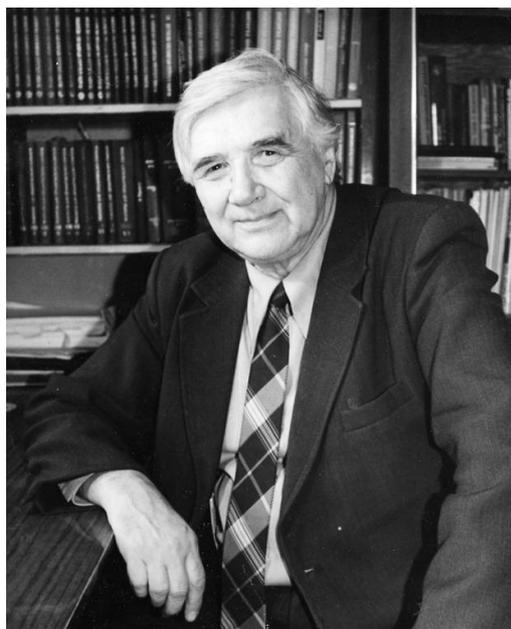
В статье описан жизненный путь Владимира Сергеевича Шкляева – участника войны с Японией, ректора Пермского фарминститута, организатора лаборатории синтеза активных реагентов Института органической химии УрО РАН, заслуженного деятеля науки РФ, доктора химических наук, профессора.

В.С. Шкляев родился 28 октября 1917 г. в слободе Савинцы Изюмского уезда Харьковской губернии в семье подпоручика Сергея Николаевича Шкляева и врача Елизаветы Григорьевны Слаутиной. Про Сергея Николаевича Шкляева (1888–1918) известно, к сожалению, немного. Он земляк Елизаветы Григорьевны, был знаком с семьей Слаутиных. Сергей Николаевич учился в Санкт-Петербургском лесном институте, во время Первой мировой ушел вольноопределяющимся на фронт, был ранен. За личную храбрость и доблесть подпоручик С.Н. Шкляев был награжден Георгиевским крестом, после ранения попал в госпиталь в Савинцах, в котором работала Елизавета Григорьевна. Так судьба свела их накануне событий 1917 года. 28 октября 1917 г. в семье родился сын Владимир.

А потом – Октябрьская революция, Гражданская война. Савинцы переходили из рук в руки: белые, красные, зеленые, махновцы и просто безыдейные бандиты.

Село стояло примерно в двух верстах от железной дороги, и из воспоминаний матери Владимир Сергеевич знал, что добропорядочные жители вечерами закладывали подводы, доставали обрезы и ехали на «промысел».

Сергея Николаевича пытались мобилизовать то одни, то другие. Не желая участвовать в этой неразберихе, он уехал из Савинцев, по дороге заболел тифом и умер. Могила его неизвестна...



*Владимир Сергеевич Шкляев
(28.10.1917–10.07.2003)*

Доктору хватало работы при всех властях. Дети росли тогда, конечно, мало что понимая в происходящем. Дома говорили по-русски, на улице – по-украински. Этот язык Владимир Сергеевич понимал всю жизнь, любил и знал украинские песни.

Однако поднимать одной трое детей без поддержки было тяжело, и знакомые уговорили Елизавету Григорьевну переехать поближе к ним, в старинный русский город Рязск (Рязанская губерния). Через несколько лет, в 1929 г., семья переехала в Пермь, где к тому времени уже жили родные Елизаветы Григорьевны.

В.С. Шкляев мало вспоминал школьные годы. Возможно, многочисленные реформы образования «доставали» и учеников. Чего стоила только «бригадная система обучения», при которой «бригада» из шести-семи учеников для ответа на уроке выдвигала одного ученика, оценка знаний которого и являлась общей... В 1934 г. новая школьная реформа предполагала продлить обучение еще на год, но В.С. Шкляев решил по-своему – уйти из школы и поступить на химический факультет Пермского университета. Оказалось, что приемные экзамены уже заканчивались. Он добился разрешения сдать все экзамены в один день и сделал это!

Годы учебы в университете Владимир Сергеевич вспоминал с удовольствием: друзья, спорт, интересная учеба. Тогда в университете обучалось всего около 900 человек и практически все всех знали. Много рассказывал о своих преподавателях: профессоре М.Д. Марко, доцентах И.И. Лапкине и Р.В. Мерцлине, ректоре университета А.И. Букиреве.

Под руководством И.И. Лапкина была выполнена и дипломная работа студентов В.С. Шкляева и Т.И. Горбуновой (Шкляевой) «Реакция взаимодействия магнийброммезитилена с этилформиатом и этилацетатом». Она была напечатана в 1940 г. в «Журнале общей химии» и стала первой статьей в многолетних и общепризнанных исследованиях И.И. Лапкина по реакционной способности металлоорганических соединений непереходных металлов. Даже

сейчас публикация дипломной работы в центральной печати – явление не частое, что уж говорить о 1940 г., когда журнал являлся чуть ли не единственным научным периодическим изданием, в котором публиковались работы по органической химии. Следует упомянуть, что реактивная и приборная база тогдашнего химфака оставляли желать лучшего и большинство реактивов сотрудники и студенты готовили сами.

Как вспоминал В.С. Шкляев, для получения объекта исследования – мезитилена – на начальном этапе бралось 20 л ацетона и после довольно продолжительных операций получали примерно 250 мл мезитилена. А ведь надо было еще отрабатывать его бромирование и изучать реакции...

Студенты много занимались спортом – кроме популярных тогда эстафет, это были и лыжи, и легкая атлетика, и волейбол. В.С. Шкляев активно включился в спортивную жизнь университета, особенно любил волейбол и, уже после войны, даже входил в сборную города.

В 1939 г. Владимир Сергеевич окончил химический факультет и через неделю, 4 июля, женился на своей однокурснице Тамаре Ивановне Горбуновой, с которой прожил до своей смерти 64 года...

В том же году он был призван на действительную военную службу. В октябре 1939 г. В.С. Шкляев был направлен в тогдашнюю «горячую точку» – на Дальний Восток, в Маньчжурию. После прохождения курса молодого бойца подал заявление в сержантскую школу, откуда вышел командиром орудия. В декабре 1941 г. В.С. Шкляева приняли кандидатом в члены ВКП(б). В дальнейшем, после офицерских курсов, Владимир Сергеевич прошел путь до старшего лейтенанта, командира артиллерийского дивизиона 105-го артиллерийского полка. В ноябре 1942 года боевой командир и офицер Владимир Шкляев в самый разгар событий под Сталинградом вступает в ряды ВКП(б), и в партию тогда шли совсем не ради карьеры. 8 августа 1945 г. СССР объявил Японии войну

и 9 августа начал военные действия. Такой поворот событий имел решающее влияние на исход войны на Тихом океане. Как вспоминал папа, офицеры в дивизии в первые дни боевых действий все время допытывались у него, «что это за бомба такая – раз – и города нет, ты же химик, объясни...».

После демобилизации в 1946 г. В.С. Шкляев вернулся в Пермь, где работал инструктором в аппарате Пермского обкома и секретарем по военно-физкультурной работе горкома ВЛКСМ. Время шло, и надо было решать: оставаться на организационной работе или вернуться к своей специальности, и в 1948 г. Владимир Сергеевич поступает в Пермский фармацевтический институт в качестве ассистента кафедры органической химии и под руководством доцента Павла Алексеевича Петюнина в 1952 г. защищает кандидатскую диссертацию на тему «Активность кольцевых реакционно-способных групп как фактор образования циклических систем».

В 1954 г. доцент В.С. Шкляев был назначен ректором Пермского фармацевтического института и в этой должности работал до 1963 г., занимаясь укреплением материальной базы института и расширением базы научных исследований.

По многочисленным отзывам коллег, работая на руководящих должностях, он всегда проявлял себя как грамотный, эрудированный, способный организатор вузовской работы. В это очень напряженное время В.С. Шкляев читает курс лекций по органической химии на уровне современных достижений химической науки, постоянно совершенствует методику проведения лабораторных и семинарских занятий, активно решает вопросы методического и материально-технического обеспечения учебного процесса и научных исследований.

Организационную и методическую работу успешно сочетает с научной деятельностью. Научные интересы

В.С. Шкляева отличались завидным постоянством и связаны с изучением химических превращений, реакционной способности и связи строения и биологического действия соединений с диарилметилольной группой.

Однако административная ректорская работа мешала научной, той, ради которой он пришел в вуз, и с 1963 г. В.С. Шкляев перешел на работу заведующим кафедрой органической химии фармацевтического института, у него появились первые аспиранты (В.И. Панцуркин и Ю.С. Чекрышкин, впоследствии ставшие докторами наук и профессорами).

Освобождение от административных обязанностей позволило направить все силы на научно-исследовательскую деятельность, о чем можно судить по списку научных работ. С 1965 по 1971 годы было опубликовано более 30 статей, и в 1970 г. В.С. Шкляев защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование в области соединений с диарилметилольной группой»*, а в 1972 г. ему было присвоено ученое звание профессора. Следует отметить, что в ходе работы В.С. Шкляевым было проведено изучение скоростей реакций и установление зависимости реакционной способности от констант Гаммета – Тафта заместителей в арильных фрагментах.

В конце 60-х – начале 70-х годов в Перми начинают предприниматься усилия по созданию академического института химического профиля. Наряду с профессорами И.И. Лапкиным, А.Н. Кетовым, И.М. Кирко в подготовке материалов принимал участие и В.С. Шкляев. Пермь постепенно «набирала вес», и в 1973 году в университете была открыта аспирантура для подготовки кадров для будущего Института органической химии УНЦ АН СССР.

В постановлении ЦК КПСС «О работе Уральского научного центра Академии наук СССР» были отмечены достижения ученых Урала, и после него было

* Шкляев В. С. Исследования в области соединений с диарилметилольной группой. – Пермь: ПГУ им. А.М. Горького, 1970. – 45 с.

принято решение создать в Перми новое академическое учреждение – Институт органической химии с опытным производством. Коллективу института ставилась задача исследования проблем создания новых органических веществ и материалов, необходимых для высокоразвитой химической промышленности страны. В 1980 г. В.С. Шкляев переходит на работу в Отдел химии Института механики сплошных сред УНЦ АН СССР, где организует лабораторию синтеза активных реагентов. С 1989 г. и до своей кончины В.С. Шкляев трудился в должности ведущего научного сотрудника этой же лаборатории.

За долгие годы работы профессором В.С. Шкляевым создана научная школа в области синтеза азотсодержащих гетероциклических соединений.

Ряд реакций, осуществленных в стенах фарминститута, весьма оригинален: получение лактамов со средней величиной цикла (8–11-членные), циклизация мезитилена (!) в хинолин, зависимость величины гетероциклического кольца от природы циклизующего агента и т.д. Своеобразным рубежом явилась серия работ по циклизации бензиламидов в производные 3,4-дигидроизохинолина, что практически совпало с переходом В.С. Шкляева на работу в отдел химии ИМСС УНЦ РАН, и в дальнейшем основным направлением деятельности стали реакции образования подобных систем, что позволило за короткий срок выпустить 6 кандидатов наук, а всего под руководством Владимира Сергеевича защищено 3 докторских и 14 кандидатских диссертаций, причем благодаря совмест-

ным работам с коллегами в Перми, Москве и Санкт-Петербурге защищено еще 5 докторских диссертаций.

Большое место в научных исследованиях В.С. Шкляева уделено рассмотрению механизмов органических реакций, установлению количественного влияния заместителей на реакционную способность карбониевых ионов, вопросам установления связи «структура – активность» в ряду анилидов диалкиламинокарбониевых кислот. Благодаря данным исследованиям, профессором В.С. Шкляевым и его учениками разработан лекарственный препарат местно-анестезирующего действия «Анилокаин», разрешенный к применению Фармкомитетом. Препарат обладает множеством достоинств – он не токсичен по сравнению с применяемыми анестетиками, водорастворим, обладает всеми видами анестезии, может применяться путем аппликации – что особенно важно для стоматологии, показал высокую эффективность при лечении термических травм, мазь на основе «Анилокаина» позволяет лечить мастит у молочного скота, что предотвращает его преждевременный забой.

Всего В.С. Шкляевым опубликовано 130 статей, получено 63 авторских свидетельства СССР.

В 1999 г. В.С. Шкляеву присвоено звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации, он награжден орденом Отечественной войны II степени, медалями «За победу над Японией», «За трудовую доблесть», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия В.И. Ленина», «Ветеран труда» и рядом других.

Сведения об авторе

Шкляев Юрий Владимирович, доктор химических наук, профессор, заведующий отделом органического синтеза, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 614013, г. Пермь, Академика Королева, 3; e-mail: yushka49@mail.ru

Материал поступил в редакцию 21.02.2024 г.

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ КЕВОРКОВ – ОСНОВАТЕЛЬ ИММУНОЛОГИИ В ПЕРМИ

С.В. Ширшев, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*
Б.А. Бахметьев, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН;*
Пермский государственный медицинский университет им. Академика Е. А. Вагнера

Для цитирования:

Ширшев С.В., Бахметьев Б.А. Николай Николаевич Кеворков – основатель иммунологии в Перми // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 60–65. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.7>



НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ КЕВОРКОВ
Профессор, Заслуженный деятель науки РФ
04.12.1938 – 27.12.2004

Николай Николаевич Кеворков родился 4 декабря 1938 г. в Ташкенте, в 1962 г. окончил Курский государственный медицинский институт.

В 1965 г. успешно закончил аспирантуру на кафедре биохимии Курского медицинского института, которой руководил известный биохимик М.И. Равич-Щербо. Являясь аспирантом, Николай Николаевич одновременно был ассистентом кафедры



*Студент Курского государственного
медицинского института Н.Н. Кеворков*
(справа)

и в 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Биосинтез антител и соотношение белковых фракций сыворотки крови в условиях экспериментальной гипо-, гипертермии и лихорадочного состояния».

В 1969 г. Н.Н. Кеворкова назначают на должность старшего преподавателя кафедры биохимии, а в 1971 г. он получает звание доцента.



*Аспирант и ассистент кафедры биохимии
Курского медицинского института*

В 1974 г. Николай Николаевич по приглашению ректора Пермского государственного медицинского института Е.А. Вагнера переехал в г. Пермь и возглавил кафедру биохимии. Тогда это был молодой 36-летний доцент, который буквально завораживал студенчество своими интересными лекциями. Неординарная манера изложения, доступность подаваемой информации, прекрасное знание материала позволили Николаю Николаевичу завоевать не только сердца сотрудников кафедры и студентов, но и быть одним из самых уважаемых преподавателей института, к мнению которого всегда прислушивался Ученый совет.



*Заведующий кафедрой биохимии Пермского
государственного медицинского института
(1977 г.)*

За время работы в Пермском государственном медицинском институте, который в последующем был переименован в академию, Николай Николаевич «открыл» новую науку для сотрудников и студентов, состоящих в студенческом научном обществе кафедры – иммунологию. Близкий друг и соратник Рэма Викторовича Петрова, Ивана Николаевича Головистикова, Александра Александровича Ярилина, Анатолия Николаевича Чередыева, Владимира Александровича Козлова, Елены Андреевны Корневой и многих других выдающихся иммунологов из Москвы, Санкт-Петербурга, Томска и Новосибирска, Николай Николаевич на современном уровне начал пионерские исследования по гормональному контролю иммунной системы в эксперименте.

В г. Перми и области он впервые ввел в исследование иммунной системы иммунограмму и стал внештатным главным иммунологом города.



*IV школа иммунологов
Пермь - 86*



*IV школа иммунологов СССР (Пермь, 1986 г.)
Слева – направо: Н.Н. Кеворков, Е. А. Корнева,
Е.А. Вагнер*

В то время вся иммунология «делалась» на кафедре биохимии у Кеворкова. Все знали, что только Кеворков может провести компетентную экспертизу и исследования по иммунологии. Его фамилия и иммунология в Перми были синонимами. Благодаря его активной научной и педагогической деятельности иммунологией были охвачены практически все исследования на кафедрах института. Он проводил постоянные консультации, выступал в качестве оппонента и рецензента. Его активное участие в работе проблемной комиссии, которую возглавлял безвременно ушедший профессор Виктор Николаевич Каплин, совместные кафедральные заседания, особенно поддерживаемые профессором, заведующим кафедрой фармакологии Александром Семеновичем Заксом, позволяли не только непосвященным «втягиваться» в проблемы иммунологии, но и всем соискателям Николая Николаевича получать неоценимый опыт общения, научной дискуссии. Каждый отстаивал свои взгляды, убеждения, но в диалогах преобладали здравый смысл, корректность, доброжелательность и, что самое главное, научная истина. Поэтому, несмотря на разность взглядов и суждений, не было, как это часто случается, враждующих школ или отдельных ученых, которые вели интриги. По крайней мере, мы, в то время молодые ученые, неоднократно принимавшие участие в заседаниях, школах, съездах и конференциях, не чувствовали недоброжелательного отношения. Напротив, если узнавали, что мы работаем у Н.Н. Кеворкова – это был своеобразный пропуск в серьезную научную дискуссию и научные коллективы. И дело не только в том, что Николай Николаевич был прекрасным человеком, он обладал истинным, не показным талантом исследователя, ученого с оригинальным, можно сказать, нестандартным мышлением. Его работы и работы его учеников, как правило, публиковались и сейчас публикуются в центральных отечественных научных журналах и за рубежом.



*Пленум проблемной комиссии
АН и АМН СССР 1985 г.*

Здесь не было местечковой, провинциальной научной «кухни», которая замыкалась бы только на местных сборниках и тезисах региональных конференций. Это были работы, признанные всем научным сообществом, именно поэтому Николай Николаевич был истинным лидером и «отцом» Пермской школы иммунологов. Им были усовершенствованы и внедрены иммунотерапевтические подходы для коррекции иммунопатологических состояний. Профессор Кеворков впервые ввел термин «посимптомная иммунокоррекция», который определил тактику ведения больных с вторичным иммунодефицитным состоянием. На сегодняшний день практически все иммунотерапевты придерживаются этой тактики, и она дает свои положительные результаты. Николай Николаевич первым начал целенаправленное преподавание клинической иммунологии врачам и студентам медицинской академии. Благодаря его усилиям, был укомплектован врачами-иммунологами Пермский край и открыта кафедра клинической иммунологии в Пермском государственном медицинском институте, которую в 1991 г. возглавил Н.Н. Кеворков и которая продолжает существовать в настоящее время.

С 1992 года Н.Н. Кеворков по приглашению В.А. Черешнева перешел в Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, где в течение нескольких месяцев исполнял обязанности старшего научного сотрудника и был избран на должность заведующего лабораторией экологической иммунологии. Именно здесь все последующее время Николай Николаевич вел активную научную деятельность.

Были трудные постперестроечные годы: наука практически не финансировалась, зарплата выплачивалась нерегулярно. И в это время разворачивались широкомасштабные исследования по экологической иммунологии Уральского региона. Оса, Краснокамск, Кунгур, Геж, Красновишерск, Щучье, – вот далеко неполный перечень проблемных городов и районов, где производились подземные ядерные взрывы для интенсификации добычи нефти или располагались могильники химического оружия. Полученные в ходе исследований результаты широко обсуждались на международных конференциях, и в итоге была сформулирована концепция экологического прессинга на иммунную систему. Впервые в Красновишерске были проведены масштабные иммунопрофилактические мероприятия, которые позволили в 6 раз снизить частоту заболеваемости в организованных детских коллективах среди длительно и часто болеющих детей. Николай Николаевич первым в городе и области сформировал иммунологическую службу, в его лаборатории силами сотрудников проводились клиничко-иммунологические исследования больных с последующей коррекцией иммунного статуса. На основании большого клинического материала профессором Кеворковым формулируются положения об иммунопрофилактике, иммуно-

терапии и иммунореабилитации, как едином процессе ведения больных с вторичным иммунодефицитом. Данный пласт научных исследований затрагивал не только проблемы экологической иммунологии, но и гинекологии, педиатрии, психиатрии, стоматологии, офтальмологии. Были получены приоритетные данные и сформулированы оригинальные гипотезы об эндометриозе как аутоиммунном заболевании, роли иммунных механизмов в развитии гемолитической болезни новорожденных и шизофрении. С этих позиций был разработан метод перинатальной диагностики гемолитической болезни новорожденных и способ иммуномодулирующей терапии эндометриоза. Одновременно под руководством Николая Николаевича проводились фундаментальные исследования по гормональному контролю функционирования иммунной системы. Были детально изучены роль инсулина, глюкагона, тироксина, мужских и женских половых стероидных гормонов, хорионического гонадотропина. Полученные данные неоднократно представлялись на Международных форумах, обобщены в монографии «Гормоны репродукции в регуляции процессов иммунитета» (1993) и нашли широкое признание среди отечественных и зарубежных ученых. В 1995 г. Н.Н. Кеворков блестяще защитил докторскую диссертацию в форме доклада.



60-летний Юбилей Н. Н. Кеворкова (Пермский научный центр, 1998 г.)

В 1999 году за выдающиеся заслуги перед Российской наукой профессор Николай Николаевич Кеворков был удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки РФ». В этом же году он становится заместителем директора по научной работе ИЭГМ УрО РАН.



Заместитель директора по научной работе Н.Н. Кеворков и и.о. директора ИЭГМ УрО РАН В.А. Демаков

Николай Николаевич – лауреат премии 1-й степени по медицине имени Ясницкого, обладатель золотых медалей РАЕН имени Пауля Эрлиха и Рудольфа Вирхова, член Президиума правления Российского научного общества иммунологов, член редколлегии журнала «Russian Journal of Immunology». В 2003 году профессор Н.Н. Кеворков номинировался на соискание премии УрО РАН в области медицины им. Академика В.В. Парина за: 1) комплекс фундаментальных научных работ в области экспериментальной, клинической и экологической иммунологии; 2) создание Пермской научной школы иммунологов; 3) работу по формированию клинко-иммунологической службы на территории Западного Урала.

Профессором Кеворковым опубликовано более 300 научных работ, включая 4 монографии. Под его руководством выполнено 28 диссертационных работ, в том числе 6 докторских.

Свою научную работу Николай Николаевич умело сочетал с педагогической деятельностью. В последнее время вся его энергия была направлена на работу с практикующими врачами. Он регулярно читал лекции и проводил занятия по клинической иммунологии для врачей различных специальностей, при этом значительное внимание уделялось вопросам создания Центра борьбы со СПИД и лечения других форм приобретенных иммунодефицитных состояний. С 1999 года Николай Николаевич был бессменным председателем Государственной экзаменационной комиссии Пермского государственного университета и сейчас нам трудно представить, кто бы мог заменить его: остроумного, доброжелательного, но вместе с тем строгого приверженца научной истины. Всем нам, его коллегам, посчастливилось работать с Николаем Николаевичем. Все, что мы умеем и знаем в иммунологии, – это его заслуга. Он был не только наставником в науке и педагогике, но и примером в личной жизни. Легкий, но не простой, общительный, но не пошлый, остроумный и веселый. Несмотря на его высокое положение, к нему всегда можно было прийти с какой бы то ни было проблемой, и он никогда не отказывал в помощи. Это был человек, с которым чувствуешь себя как за каменной стеной и с которым всегда можно поговорить по душам. Главное, он всегда заставлял собеседника постепенно «подтягиваться» до его уровня. Он создал школу иммунологов-единомышленников – «кеворковцев», которые, как бы они ни относились друг к другу, как дети в семье – все разные, но все похожи на своего родителя, кто-то больше, кто-то меньше.

Светлая память о Николае Николаевиче Кеворкове – нашем Учителе – будет постоянно жить в наших сердцах и умах.



Сведения об авторах

Ширшев Сергей Викторович, доктор медицинских наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией иммунорегуляции, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева 13; e-mail: shirshev@iegm.ru

Бахметьев Борис Аркадьевич, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории иммунорегуляции, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева, 13, доцент кафедры иммунологии Пермского государственного медицинского университета им. Академика Е.А. Вагнера (ПГМУ), 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 26; e-mail: bachmeteyev@iegm.ru

Материал поступил в редакцию 15.03.2024 г.

ЭТЮДЫ О НАУКЕ



ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛАДИМИРА МАРКОВИЧА НОВОСЕЛИЦКОГО

С.Г. Бычков, *Горный институт УрО РАН*

Для цитирования:

Бычков С.Г. Геолого-геофизические исследования Владимира Марковича Новоселицкого // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 67–71. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.8>

Статья посвящена памяти доктора геолого-минералогических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ Владимира Марковича Новоселицкого (01.01.1935 – 29.10.2008 г.). В.М. Новоселицкий – известный в России и за ее пределами ученый в области фундаментальной и прикладной геофизики. Развиваемые им направления связаны с комплексными геолого-геофизическими исследованиями и освоением земных недр – поиск и разведка месторождений полезных ископаемых, геоэкологические, инженерно-геологические исследования, прогноз природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. Его разработки являются определяющими в теории и практике разведочной геофизики, горной геофизики, в направлении обеспечения безопасности населения и народнохозяйственных объектов.

Владимир Маркович Новоселицкий после окончания в 1958 г. кафедры геофизики Пермского университета работал в полевых партиях конторы «Пермнефтегеофизика», с 1961 г. был аспирантом и ассистентом Пермского университета. В период с 1965 по 1985 гг. он работал в Камском отделении Всесоюзного научно-исследовательского геологоразведочного института, где прошел путь от старшего геолога до заведующего отделом геофизических методов. В 1985–1988 гг. Владимир Маркович – профессор Пермского политехнического института. С 1988 г. он работал в Горном институте Уральского отделения Российской академии наук. Его научно-организационная деятельность во многом способствовала созданию и становлению Горного института УрО РАН и превращению его в крупный центр фундаментальной и прикладной науки Уральского региона.



*Владимир Маркович Новоселицкий
(01.01.1935 – 29.10.2008 г.)*

Кратко и выразительно охарактеризовал В.М. Новоселицкого Аркадий Евгеньевич Красноштейн [1]: «Начало 1986 г. Я был в то время деканом горного факультета Пермского политехнического института. Дела шли хорошо..., будущее казалось безоблачным. *И вот тут появляется Владимир Маркович Новоселицкий...* Трудно переоценить роль В.М. Новоселицкого как в создании института, так и в той отрасли науки, которой он посвятил свою жизнь» [2, с. 9].

Исследования лаборатории геопотенциальных полей, которую создал и возглавил Владимир Маркович в Горном институте УрО РАН, во многом опирались на его исследования по теории и практике интерпретации гравитационных и магнитных полей. Во все, чем сегодня занимается лаборатория, вложены его мысли, его усилия, его творческий посыл.

В.М. Новоселицким введен в интерпретационный процесс класс слоистых сред с латеральной изменчивостью физических свойств, что позволило развить новое направление, связанное с исследованием латеральной зональности осадочных слоев в пределах локальных структур и ее отражения в геофизических полях. На его работы, написанные в 1980-е годы, до сих пор ссылаются геофизики.

Крупный научный результат в области геофизики – векторные трансформации потенциальных полей, разработанные В.М. Новоселицким, – получили заслуженное признание ведущих геофизических центров России и зарубежных стран. Созданная под его руководством уникальная технология векторного сканирования геопотенциальных полей, реализованная в интерпретационной системе «Vector», нашла широкое применение при решении многих геолого-разведочных и инженерно-экологических задач, как на территории Пермского края, так и в целом по России.

В.М. Новоселицким установлен новый научный факт связи особенностей геопотенциальных полей и реальных геологических сред, определяющий методологию и методику построения тектонических

схем; обнаружен эффект автолокализации геопотенциальных полей слоистых сред нефтегазоперспективных объектов, расширяющий разведочные возможности геопотенциальных методов геофизики, разработана методика прогнозирования нефтегазоперспективных объектов по геопотенциальным полям; создан новый класс геофизических приборов на магнитных и диамагнитных подвесах; разработана и внедрена в практику наземно-подземная гравиметрия.

Созданная им научная школа широко известна как в России, так и за ее пределами. Под его руководством велся широкий фронт работ по созданию информационных технологий детального изучения земных недр. Им впервые начато комплексное изучение осадочного чехла северо-востока Урало-Поволжья с точки зрения системного подхода, что позволило достигнуть крупных успехов в деле исследования и освоения недр. Пионерские работы в изучении послышной зональности физических свойств осадочного чехла для Пермской области позволили определить нефтегазоперспективные территории и зоны, спрогнозировать 26 месторождений на территории Пермской области, 20 из которых разрабатываются.

Рост информативности и геологической содержательности решаемых задач позволили в 1998–2004 гг. перейти к качественно новому уровню научных работ и привели к необходимости тесной их интеграции с практикой полевых исследований. В.М. Новоселицкий стал одним из инициаторов и разработчиков федеральных и региональных программ освоения недр, и непосредственно занимался реализацией крупных проектов подготовки ресурсов углеводородов Приволжского федерального округа. Потенциал научного коллектива и производственные возможности полевой геофизической экспедиции, созданные В.М. Новоселицким, широко востребованы – выполнены крупные исследования по контрактам с Министер-

ством природных ресурсов и недропользователями, направленные на прогнозирование нефтегазовых объектов в Пермском крае, Волгоградской, Тюменской, Оренбургской, Кировской, Астраханской, Калининградской областях, Республике Коми, Удмуртской республике, Ханты-Мансийском автономном округе. Целый ряд научных исследований, возглавляемых В.М. Новоселицким, был поддержан грантами Российского фонда фундаментальных исследований.

Возглавляемые В.М. Новоселицким работы в области послыной зональности послужили основой для детального комплексного изучения Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) с целью его безопасной эксплуатации. В 2000–2004 гг. В.М. Новоселицким выполнены пионерские исследования на территории ВКМКС по выявлению опасных зон жилых и промышленных районов в г. Березники.

Законодательным Собранием Пермской области была принята программа «Безопасность жизнедеятельности и организация мониторинговых систем прогноза природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций на территории Пермской области на 1998–2000 гг.», разработанная под научным руководством В.М. Новоселицкого. Необходимость создания программы связана с высоким уровнем риска возникновения природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций на территории области.

В.М. Новоселицкий вел активную научно-педагогическую работу, являясь членом ученых советов по присуждению ученых степеней доктора и кандидата наук Горного института УрО РАН и Пермского государственного университета. Под его руководством выполнено и защищено 30 кандидатских и 8 докторских диссертаций. Как преподаватель и профессор Пермского государственного технического и Пермского государственного университетов он участ-

вовал в подготовке высококвалифицированных инженеров-геофизиков, геологов и геодезистов.

Владимир Маркович является автором и соавтором более 200 публикаций, включая 4 монографии и 22 авторских свидетельства на изобретения. Он проводил большую научную и научно-организационную работу, являясь членом оргкомитетов Международных и Всероссийских научных форумов. Вместе с академиком В.Н. Страховым он являлся одним из организаторов Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», имеющего огромное значение для развития фундаментальной и прикладной науки. По его инициативе были организованы школы-семинары с тем же названием. Первая такая школа прошла в 1976 г. в г. Перми. Последний раз Владимир Маркович встречал участников семинара, посвященного его 70-летию, в Перми в 2005 г.

В.М. Новоселицкий имеет государственные награды: медаль «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», 1970 г.; медаль «Ветеран труда», 1987 г.; орден Почета, 1998. Указом Президента Российской Федерации в 2006 г. за большой вклад в развитие отечественной науки он награжден орденом «За заслуги перед отечеством» IV степени. За открытие эффекта автолокализации В.М. Новоселицкий награжден серебряной медалью РАЕН им. академика Капицы (1990 г.). Он является лауреатом премии Пермской области им. Г.А. Максимова 2000 г. за создание нового метода – наземно-подземной гравиметрии.

В.М. Новоселицкий был разносторонне талантливым человеком. Он увлекался классической музыкой, искусством, мировой историей и многим другим. В 2000 г. вышел его сборник избранных стихотворений «Струнный звук». Он всегда был душой компании, любил жизнь, любил людей... Но смерть неумолима.



Участники Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей (2005 г.)»

*Зачем-то замерла струна
на самой-самой нужной ноте.
Сковала горло тишина
и осень рядом, на подлете.
Еще наполнена строка
желанием непреодолимым.
Но в небе яхты-облака
Скользят-скользят куда-то мимо.*

В. Новоселицкий, 1995 г.



Библиографический список

1. *Барях А.А., Файнбург Г.З.* А.Е. Красноштейн – ученый и человек // Вестник ПФИЦ. – 2023. – № 1. – С. 85–92. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.9>
2. Горный институт УрО РАН: 20 лет научной и образовательной деятельности / Гл. ред. А.Е. Красноштейн. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009. – 336 с.

**GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL RESEARCH OF
VLADIMIR MARKOVITCH NOVOSELITSKY**

Bychkov S.G.

Mining Institute UB RAS

For citation:

Bychkov S.G. Geological and geophysical research of Vladimir Markovitch Novoselitsky // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 1. – P. 67–71. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.8>

The article is devoted to the memory of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation Vladimir Markovich Novoselitsky (01.01.1935 – 29.10.2008). V.M. Novoselitsky is a well-known scientist in Russia and abroad in the field of fundamental and applied geophysics. The directions developed by him are related to complex geological and geophysical research and studies of the earth's subsoil – search and exploration of mineral deposits, geoecological, geotechnical research, forecasting of natural and man-made emergencies. His works remain defining in the theory and practice of exploration geophysics, mining geophysics and ensuring the safety of the population and national economic objects.

Сведения об авторе

Бычков Сергей Габриэлевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геопотенциальных полей, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»); 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: bsg@mi-perm.ru

Материал поступил в редакцию 06.03.2024 г.

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА Ю.В. СОКОЛКИНА

А.А. Ташкинов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

А.А. Чекалкин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Для цитирования:

Ташкинов А.А., Чекалкин А.А. Научное наследие профессора Ю.В. Соколкина // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 1. – С. 72–81. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.9>



*Соколкин Юрий Викторович
(1938–2020)*

Соколкин Юрий Викторович – выдающийся российский ученый-механик, профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ. В статье представлен обзор основных научных результатов работы Ю.В. Соколкина в области механики композиционных материалов и конструкций, физического и математического моделирования, аэрокосмической техники и высоких технологий. Названия разделов данной статьи, за исключением первого, соответствуют названиям научных монографий с участием Ю.В. Соколкина, которые представлены в хронологическом порядке, а первый раздел обзора посвящен содержанию диссертационной работы, выполненной Юрием Викторовичем Соколкиным в Институте механики сплошных сред УНЦ АН СССР. Каждый раздел статьи, кроме ссылки на

библиографическое описание научной монографии, содержит также ссылки на статьи с участием Соколкина Ю.В., в которых были частично опубликованы или получили дальнейшее развитие научные результаты, представленные в соответствующей монографии. Поскольку профессор Соколкин Ю.В. является автором более чем ста пятидесяти научных работ, то данный обзор не является полным и исчерпывающим, целью было отразить именно те направления, которые получили несомненное признание научного сообщества, нашли практическое применение и успешно используются в настоящее время, стали основой диссертационных работ, выполненных его учениками.

Ключевые слова: *механика композиционных материалов, физическое и математическое моделирование, аэрокосмическая техника, высокие технологии.*

Введение

Соколкин Юрий Викторович – выдающийся российский ученый-механик, профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ, родился в поселке Михайловский (Свердловская область, 1938), учился на механико-математическом факультете Уральского государственного университета (Свердловск, 1955–1960) и в аспирантуре Математического института АН СССР (Свердловское отделение, 1964–1968), работал инженером на Свердловском машиностроительном заводе имени М.И. Калинина (1960 – 1964), кандидат физико-математических наук (1969), научный руководитель – профессор С.Д. Волков (1919–1980). В 1969 г. Ю.В. Соколкин переехал в Пермь, где работал научным сотрудником в Пермском политехническом институте (1969), старшим научным сотрудником в Отделе физики полимеров УНЦ АН СССР (1970) и заведующим лабораторией «Физического и математического моделирования» (лаборатория №2) в Институте механики сплошных сред УНЦ АН СССР (1971–1984). За время работы в Институте механики сплошных сред Ю.В. Соколкин стал старшим научным сотрудником по специальности «Механика деформированного твердого тела» (1974), доктором физико-математических наук (1983) и профессором по специальности «Механика деформированного твердого тела» (1983). Начиная с 1984 по 2020 годы, Ю.В. Соколкин работал в Пермском национальном исследовательском политехническом университете, где возглавлял кафедру механики композиционных материалов и конструкций (1984–2015), был деканом аэрокосмического факультета (1993–2003) и профессором кафедры механики композиционных материалов и конструкций (2015–2020), умер и похоронен в Перми (2020). В книге очерков о выдающихся ученых Пермского национального исследовательского политехнического университета «Такие близкие звезды» Соколкину Юрию Викторовичу посвящена глава «Родом из юности» [1, с. 123–150].

Стохастические краевые задачи механики композитов

В диссертации Ю.В. Соколкина на соискание ученой степени доктора физико-математических наук [2] предложены стохастические модели композитов, введены основные связанные с темой понятия, описаны типы случайных полей и их свойства, дано стохастическое описание структуры композита. Определены структурные физические величины для вырожденной модели, локально-эргодической модели класса B_2 и квазилокально-эргодических моделей классов B_2 и B_3 . Сформулирована краевая задача механики композитов для локально-эргодической модели микронеоднородного деформируемого твердого тела, в рамках гипотез о макрооднородности и квазиизотропии микронеоднородной сплошной среды получено каноническое разложение модулей упругости макрооднородной квазиизотропной среды. Сформулирована краевая задача теории упругости второго типа при конечных дисперсиях физических свойств среды, вычислены статистические моменты высших порядков пространственного функционала и определены эффективные модули упругости хаотично армированных волокнистых композитов, а также эластомерных композитов с жесткими и податливыми сферическими включениями. Исследовано распределение полей структурных деформаций и напряжений в составных осесимметричных конструкциях сложной формы, в рамках локально-эргодической модели микронеоднородной среды выполнен анализ составных систем при действии давления: абсолютно жесткая оболочка – наполнитель с плоскими торцами, ортотропная оболочка – наполнитель с плоскими торцами, ортотропная оболочка – наполнитель с криволинейными торцами, ортотропная оболочка – наполнитель сложной формы. Численное исследование структурных деформаций и напряжений в пространственных краевых задачах механики композитов для локально-эргодической модели микронеоднородной среды предполагало постановку

краевой задачи теории упругости в моментных функциях первого порядка, построение трехмерных криволинейных сеток естественной геометрии, вывод и исследование уравнений в естественных криволинейных координатах для трехмерной конечно-элементной схемы с оценкой погрешности аппроксимации уравнений Ламе. Проведена априорная оценка и обусловленность трехмерной конечно-элементной схемы в естественных криволинейных координатах, предложены блок-схемы и вычислительные алгоритмы определения трехмерных полей структурных деформаций и напряжений для микронеоднородной среды. Выполнено численное моделирование структурных деформаций и напряжений в плоских краевых задачах теории упругости для неоднородных тел сложной криволинейной формы и трехмерных пространственных тел сложной формы. Дальнейшее развитие постановок и методов решения краевых задач теории упругости для микронеоднородных сред связано с учетом несовершенств формы и разброса свойств структурных компонентов. Для этого была проведена оценка связи между средними значениями физических величин по координатам и реализациям, которая позволила обосновать использование квазилокально-эргодической модели для описания микронеоднородной среды, в том числе и для случайных граничных условий. Полученные новые результаты позволили определить не только макроскопические модули упругости композитов, но и дисперсии упругих свойств локально-эргодической и квазилокально-эргодической микронеоднородной среды, что позволило сформулировать принцип локальности и предложить метод локального приближения для задач механики микронеоднородных сред. Следующий этап развития данного подхода был связан с обобщением краевых задач теории упругости для вязкоупругих микронеоднородных сред при случайных нагрузках. Обоснован метод и предложен принцип построения уравнений в моментных функциях для статистических задач вязкоупруго-

сти. Постановка краевой задачи для уравнений в моментных функциях и метод решения были успешно реализованы в рамках нелинейной теории вязкоупругости. Получены решения задач о релаксации напряжений в нелинейном вязкоупругом стержне и о ползучести нелинейной вязкоупругой балки, изгибаемой случайным моментом. Дальнейшее развитие нелинейной стохастической краевой задачи вязкоупругости было связано с использованием вырожденной и локально-эргодической моделей деформированного твердого тела. Деформирование композита рассматривалось в рамках теории случайных процессов, с целью построения физических уравнений для вырожденной модели предложен метод идентификации, а статистический анализ процессов ползучести или релаксации проводился на основе совокупности реализаций, отдельно исследовано влияние погрешности физического эксперимента на рассеивание результатов испытаний. Полученные решения нелинейных краевых статистических задач вязкоупругости микронеоднородных тел для вырожденной и локально-эргодической моделей позволили провести оценку надежности конструкций в условиях простой ползучести. Оценка работоспособности композитных конструкций на основе стохастических критериев разрушения имела важное практическое значение. Математическое моделирование разрушения микронеоднородных сред с повреждаемой микроструктурой, обобщение статистических критериев разрушения сред с микроповреждениями позволили оценить работоспособность систем «оболочка – наполнитель». Представленные в диссертации [2] основные результаты ранее были опубликованы в научных журналах [3–8], серии научно-технических отчетов о НИР и НИОКР, а также в научных сборниках УНЦ АН СССР.

Гравитационная классификация зернистых материалов (1974)

В научной монографии [9] обобщается теория и практика гидравлической и воздушной классификации зернистых материалов в гравитационном поле. Описыва-

ются конструкции новых отечественных и зарубежных гидравлических и воздушных классификаторов. Дается описание гравитационной классификации как стохастического явления, а также приводится анализ основных закономерностей разделения с учетом конструкции аппарата, взаимодействия частиц между собой и со стенками аппарата. Приводятся методики расчета гидравлических и воздушных гравитационных классификаторов. Основные разделы посвящены следующим вопросам: общие сведения и основные типы гравитационных классификаторов, физические основы гравитационной классификации, автомодельность процессов гравитационной классификации, критерии качества процессов разделения, соотношение критериальных методов оценки качества классификации и кривых разделения, динамическая модель гравитационной классификации, кинетическая модель гравитационной классификации, принципы рациональной организации и направления совершенствования процесса гравитационной классификации, методика расчета гравитационных классификаторов, стохастическая модель гравитационной классификации. Представленные в монографии [9] основные результаты частично опубликованы в научных статьях [10–13].

Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел (1984)

В научной монографии [14] исследуются особенности поведения структурно неоднородных материалов и конструкций из них при действии статических нагрузок. Построены модели и рассмотрены постановки и методы решения стохастических краевых задач механики деформирования и разрушения. Получены новые результаты по прогнозированию макросвойств и расчету микронапряжений и микродеформаций для сред со случайной и регулярной структурой, по изучению связи процессов микро- и макроразрушения. Приведены экспериментальные данные. Основные разделы посвящены следующим вопросам: модели и ограничения структурно неоднородных сред,

стохастические задачи теории упругости структурно неоднородных сред, метод локального приближения, краевые задачи теории упругости и вязкоупругости при случайных нагрузках, стохастические модели деформирования и разрушения структурно неоднородных сред, оценка работоспособности конструкций из композиционных материалов на основе структурных критериев разрушения. Представленные в монографии [14] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [15–21].

Волокнистые композиционные материалы на основе титана (1990)

В научной монографии [22] изложены современные технологические методы армирования сплавов на основе титана металлическими и неметаллическими волокнами, даны конкретные рекомендации, позволяющие свести к минимуму начальную поврежденность микроструктуры композиций и обеспечивающие сохранность армирующих элементов. Предлагается теория деформирования однонаправленных композиционных материалов с непрерывными волокнами. Построены новые статистические модели деформирования и разрушения композитов. Разработанные модели и методы проиллюстрированы примерами. Основные разделы посвящены следующим вопросам: структура и свойства титана и его сплавов, армирование титана и его сплавов металлическими и неметаллическими волокнами, армирование титановых сплавов волокнами бора и бора с покрытием карбида кремния, метод сварки взрывом и его применение для создания волокнистых композиционных материалов на основе титана, теория деформирования однонаправленных волокнистых композитов, статистические модели микромеханики деформирования и разрушения композитов, моделирование механического поведения волокнистых композитов на основе титана. Представленные в монографии [22] основные результаты получили развитие в научных статьях [23–27] для порошковых материалов на основе железа.

*Технология и проектирование
углерод-углеродных композитов
и конструкций (1996)*

В научной монографии [28] изложены основы технологии создания углерод-углеродных композитов и методы прогнозирования их деформационных, прочностных и теплофизических свойств. В первой главе приведены типы и структуры углеродных волокон, а также их свойства и технологии изготовления. Во второй главе изложены основные принципы конструирования армирующих систем и каркасов. Приведены основные схемы армирования углерод-углеродных материалов с различной ориентацией армирующих элементов, широко применяемые на практике. В третьей главе рассмотрены вопросы формирования углеродной матрицы и композитного материала в целом. Приведены основные типы углеродной матрицы и влияния технологических параметров процесса на ее структуру. Рассмотрено влияние исходной матрицы и легирования на свойства углеродного композита. В четвертой главе приведены физико-механические свойства и структура углеродных композитов при комнатной и повышенной температуре. Большое внимание уделено вопросам влияния пористости и вида армирования на характеристики материала. Рассмотрены вопросы разрушения и трещиностойкости углерод-углеродных композитов. В пятой главе рассматриваются методы осреднения в краевых задачах механики углерод-углеродных композитов, а также осреднение стохастической задачи микромеханики на основе модели однородной среды методом локального приближения и методом периодических составляющих. Проведена оценка влияния дискретного и непрерывного разбросов упругих свойств армирующих волокон на механическое поведение однонаправленного углеродного композита, исследовано критическое деформирование и разрушение углерод-углеродного материала. В шестой главе изложены методы прогнозирования деформационных свойств углерод-углеродных материалов. В рамках

структурно-феноменологического подхода рассмотрены модели деформирования пространственно армированных композитов и получены определяющие соотношения для различных структур. Приведены результаты численного прогнозирования упругих свойств углеродной матрицы и композита в целом. Разработан подход, позволяющий описывать кривые деформирования с учетом ниспадающего участка. В седьмой главе в рамках многоуровневого подхода рассмотрены вопросы прогнозирования прочностных свойств и трещиностойкости углеродных композитов. Разработаны методы численного построения предельных поверхностей и критериев соотношений для углеродного материала на основе сплайн-аппроксимации. Приведены результаты численного прогнозирования предельных характеристик тканых слоистых композитов с углеродной матрицей. В заключительной главе содержатся результаты численного исследования механического поведения и несущей способности оболочечных конструкций и осесимметричных тел из углерод-углеродных композитов при действии нестационарных силовых нагрузок. Найдены поля напряжений и деформаций, показаны зоны разрушения композитных конструкций. Представленные в монографии [28] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [29–31].

*Механика неупругого
деформирования и разрушения
композиционных материалов (1997)*

В научной монографии [32] исследованы закономерности и модели процессов накопления повреждений, критического деформирования и структурного разрушения композиционных материалов при квазистатическом нагружении. Рассмотрены постановки, методы и результаты решения стохастически и физически нелинейных краевых задач механики деформирования и разрушения структурно-неоднородных сред. Изучены вопросы устойчивости процессов деформирования в зави-

симости от характеристик нагружающих систем. Получены новые результаты по прогнозированию эффективных свойств, расчету микронапряжений и микродеформаций для сред со случайной и периодической структурой. Основные разделы посвящены следующим вопросам: закономерности и модели процессов деформирования и разрушения композиционных материалов, структурно-феноменологическая модель механики микронеоднородных сред, краевые задачи теории упругости композитов со случайной структурой, метод периодических составляющих, метод локального приближения, краевая задача механики неупругого деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел, математическое моделирование процессов микро- и макроразрушения композиционных материалов, упругое деформирование и структурное разрушение слоистых композитов, краевая задача механики устойчивого закритического деформирования и разрушения поврежденных тел с зонами разупрочнения, устойчивое закритическое деформирование материалов в элементах конструкций, закритическое деформирование элементов структуры композиционных материалов. Представленные в монографии [32] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [33–37].

Электроупругость пьезокомпозитов с нерегулярными структурами (2003)

В научной монографии [38] представлены результаты теоретических исследований свойств и закономерностей поведения нового класса пьезоэлектриков и пьезомагнетиков – пьезоактивных композитов – на основе решения стохастических связанных краевых задач термоэлектроупругости для неоднородных нерегулярных сред с пьезоактивными анизотропными элементами структуры. Проведен численный анализ совместного влияния разупрочненности, геометрии и величины относительного объемного содержания эллипсоидальных пор и включений на эффективные пьезомеханические свойства,

значения инвариантов напряжений в каркасах пористых пьезокерамик и кривые намагниченности магнитокерамик, выявлены новые эффекты. Основные разделы посвящены следующим вопросам: структурно-феноменологический подход в механике композитов, стохастическая краевая задача для двухфазных квазипериодических пьезоструктур, решение стохастической краевой задачи электроупругости для квазипериодических пьезокомпозитов в реализациях случайных полей, локальные стохастические поля и локально-осредненные краевые задачи для многофазных случайных структур. Представленные в монографии [38] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [39–42].

Газоупругие процессы в энергетических установках (2007)

В научной монографии [43] рассматривается газоупругий подход к расчету колебательных режимов в энергетических установках. Предлагаются методологические и методические основы данного подхода, определены области его применения. Разработаны физическая и математическая модели процесса, унифицированный алгоритм и метод решения. Приводятся расчеты для нелинейной динамической системы «поток газа – горение – деформируемая многослойная конструкция». Получены условия возникновения резонансных колебательных режимов в энергетических установках. Приводится анализ влияния геометрических, физико-механических, массовых характеристик конструкции, параметров нагрузки и вида испытаний на параметры колебаний давления газа в свободном объеме. Основные разделы посвящены следующим вопросам: проблемы идентификации и учета газоупругих процессов в энергетических установках, методологические основы анализа газоупругих процессов в энергетических установках, методические основы анализа газоупругих процессов в энергетических установках, моделирование динамического напряженно-деформирован-

ного состояния конструкции большого удлинения, моделирование нерезонансных процессов газопругости в энергетических установках с учетом жесткости нагружающей системы, моделирование резонансных режимов газопругого взаимодействия в энергетических установках с учетом жесткости нагружающей системы. Представленные в монографии [43] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [44–46].

Технологическая механика топливных магистралей жидкостных ракетных двигателей (2009)

В научной монографии [47] представлены результаты исследований по особенностям конструирования и технологии производства сварных магистралей подачи горючего и окислителя жидкостных ракетных двигателей. На примере конструкции двигателя РД-275 проведен комплексный анализ механического поведения сварных металлических трубопроводов сложной пространственной конфигурации, включающий экспериментальное исследование упругопластического поведения легированных жаропрочных сталей, определение комплекса прочностных свойств и характеристик трещиностойкости сварных соединений. Приведены также результаты пространственного математического моделирования магистралей подачи топлива и окислителя в различных режимах статического и динамического нагружения. Основные разделы посвящены следующим вопросам: конструкции магистралей подачи горючего и окислителя жидкостного ракетного двигателя РД-275, технология изготовления магистралей подачи горючего и окислителя жидкостного ракетного двигателя РД-275, экспериментальные методы исследования прочности и трещиностойкости сварных соединений, экспериментальные исследования прочностных и жесткостных характеристик материала трубопроводов – хромоникелевой стали 12Х21Н5Т, моделирование механического поведения и расчет несущей способности топливных магистралей жидкостного ракетного двигателя

РД-275. Представленные в монографии [47] основные результаты частично опубликованы и получили развитие в научных статьях [48–50].

Заключение

Научные интересы Юрия Викторовича Соколкина всегда были разноплановы и разнообразны, он выдвигал новые направления исследований и активно подключался к актуальным прикладным задачам, уделял большое внимание подготовке научных и инженерных кадров высшей квалификации. На официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета размещена презентация о профессоре Ю.В. Соколкине [51], электронная презентация доступна по ссылке: <https://pstu.ru/files/2/file/kafedra/akf/mkmk/Sokolkin.pdf> или по QR-коду, размещенному в конце статьи. Поскольку Юрий Викторович является автором более чем ста пятидесяти научных работ, то данный обзор не является полным и исчерпывающим, целью было отразить именно те направления, которые получили несомненное признание научного сообщества, нашли практическое применение и успешно используются в настоящее время, стали основой диссертационных работ, выполненных его учениками. Деятельность Ю.В. Соколкина отмечена государственными наградами – орденом «Знак Почета» (1983), почетным званием «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (1998) и орденом Дружбы (2004), а также многочисленными отраслевыми наградами, почетными грамотами, званиями и премиями в области науки и образования.



Соколкин QRcode.png

Библиографический список

1. Журавлев С.Ф. Такие близкие звёзды. – Пермь: Книжная площадь, 2003. – 152 с.
2. Соколкин Ю.В. Стохастические краевые задачи механики композитов / дис. докт. физ.-мат. наук: 01.02.04. – Пермь, ИМСС УНЦ АН СССР, 1981. – 434 с.
3. Волков С.Д., Соколкин Ю.В. О нелинейной ползучести пластиков при случайных нагрузках // Механика полимеров. – 1968. – № 2. – С. 237–245. <https://doi.org/10.1007/BF00855616>.
4. Соколкин Ю.В. Ползучесть нелинейной вязкоупругой балки, изгибаемой случайным моментом // Механика полимеров. – 1968. – № 4. – С.132–140. <https://doi.org/10.1007/BF00855775>.
5. Елтышев В.А., Поздеев А.А., Соколкин Ю.В. Напряженно-деформированное состояние цилиндра с криволинейными торцами, скрепленного с ортотропной стеклопластиковой оболочкой // Механика полимеров. – 1976. – № 2. – (Деп. в ВИНТИ № 203-76 от 03.02.76). – С. 8.
6. Елтышев В.А., Поздеев А.А., Соколкин Ю.В. О совместной работе системы ортотропная стеклопластиковая оболочка – наполнитель // Механика полимеров. – 1976. – № 5. – С. 931–934. <https://doi.org/10.1007/BF00856351>.
7. Леонтьев В.А., Олейник Б.Д., Перевозчиков В.Г., Соколкин Ю.В. Установка для испытания на прочность колец из композиционных материалов // Механика полимеров. – 1977. – № 6. – С. 1119–1121. <https://doi.org/10.1007/BF00867011>.
8. Соколкин Ю.В., Фрейнд В.Г. Динамическое нагружение полого цилиндра случайным внутренним давлением // Механика полимеров. – 1975. – № 5. – (Деп. в ВИНТИ №1307-75 от 14.05.75). – С. 954.
9. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистых материалов. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
10. Барский М.Д., Соколкин Ю.В. Нестационарные процессы гравитационной классификации // Известия вузов. Горный журнал. – 1970. – № 3. – С. 142–146.
11. Барский М.Д., Соколкин Ю.В. О построении стохастической модели процесса гравитационной классификации // Известия вузов. Горный журнал. – 1968. – № 7. – С. 168–171.
12. Барский М.Д., Соколкин Ю.В. Стохастическая модель гравитационной классификации в турбулентном противопотоке // Известия вузов. Горный журнал. – 1969. – № 12. – С. 168–171.
13. Барский М.Д., Соколкин Ю.В. Стохастическая модель процесса равновесной классификации в восходящем ламинарном потоке // Известия вузов. Горный журнал. – 1969. – № 7. – С. 156–158.
14. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 116 с.
15. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Исследование статических задач механики структурно неоднородных сред на основе принципа локальности // Известия Академии наук СССР. Механика твёрдого тела. – 1982. – № 3. – С. 175–182.
16. Sokolkin Yu.V., Skachkov V.A. A structural approach for estimating the efficiency of structural elements made out of composite materials // Mechanics of composite materials. – 1982. – Т. 17. – № 4. – С. 408–414. <https://doi.org/10.1007/BF00605906>.
17. Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Statistical models of deformation and failure of composites // Mechanics of composite materials. – 1985. – Т. 20. – № 5. – С. 585–590. <https://doi.org/10.1007/BF00610607>.
18. Anoshkin A.N., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Microstress fields and the mechanical properties of disordered fiber composites // Mechanics of composite materials. – 1991. – Т. 26. – № 5. – С. 628–633. <https://doi.org/10.1007/BF00616643>.
19. Sokolkin Yu.V., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Probabilistic model of the strength, crack resistance and fatigue life of a unidirectionally reinforced fibrous // Mechanics of composite materials. – 1992. – Т. 28. – № 2. – С. 133–139. <https://doi.org/10.1007/BF00613319>.
20. Sokolkin Yu.V., Volkova T.A. Multipoint moment functions of stress and strain distributions in stochastic composites // Mechanics of composite materials. – 1992. – Т. 27. – № 4. – С. 429–435. <https://doi.org/10.1007/BF00613572>.
21. Anoshkin A.N., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Inelastic deformation and fracture of disordered fiber-reinforced composites // Mechanics of composite materials. – 1994. – Т. 29. – № 5. – С. 458–463. <https://doi.org/10.1007/BF00611948>.
22. Анциферов В.Н., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Людаговский А.В., Ханов А.М. Волокнистые композиционные материалы на основе титана. – М.: Наука, 1990. – 136 с.
23. Antsiferov V.N., Sokolkin Y.V., Shestakov P.D., Kuprin P.B. Optimization of the technology of obtaining titanium alloy VT-6 the criterion of endurance // Soviet powder metallurgy and metal ceramics. – 1989. – Т. 28. – № 5. – С. 421–423. <https://doi.org/10.1007/BF00795051>.
24. Анциферов В.Н., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А., Бабушкин А.В. Численная модель циклической долговечности порошкового материала // Порошковая металлургия. – 1994. – № 5–6. – С. 112–118. <https://doi.org/10.1007/BF00560207>.

25. Анциферов В.Н., Бабушкин А.В., Масленников Н.Н., Соколкин Ю.В., Шацов А.А., Чекалкин А.А. О влиянии углерода на конструкционную прочность и усталостную выносливость никельмолибденовой порошковой стали // *Металлы*. – 1996. – № 4. – С. 62–68.
26. Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А., Бабушкин А.В. Прогнозирование физических и механических свойств порошковых и армированных высокопрочными волокнами металлических материалов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 1995. – № 2. – С. 53–57.
27. Antsiferov V.N., Babushkin A.V., Sokolkin Yu.V., Shatsov A.A., Chekalkin A.A. Features of powdered material deformation with cyclic loading // *Powder metallurgy and metal ceramics*. – 2001. – Т. 40. – № 11–12. – С. 569–572.
28. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинов, А.А. Ташикинов, А.М. Постных, А.А. Чекалкин. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.
29. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multistage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells // *Mechanics of composite materials*. – 1994. – Т. 30. – № 1. – С. 55–60. <https://doi.org/10.1007/BF00612734>.
30. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Kotov A.G. A structural multiscale approach to the design of spatially reinforced carbon-carbon composites // *Mechanics of composite materials*. – 1995. – Т. 31. – № 2. – С. 143–148. <https://doi.org/10.1007/BF00616282>.
31. Соколкин Ю.В., Аношкин А.Н., Котов А.Г., Чекалкин А.А. Информационная система «Композиционные материалы и конструкции» // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 1996. – Т. 2. – № 1. – С. 91–93.
32. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташикинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
33. Vil'deman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Predicting inelastic deformation and failure of laminated composites // *Mechanics of composite materials*. – 1992. – Т. 28. – № 3. – С. 214–221. <https://doi.org/10.1007/BF00604912>.
34. Sokolkin Yu.V., Vil'deman V.E. Post-critical deformation and failure of composite materials // *Mechanics of composite materials*. – 1993. – Т. 29. – № 2. – С. 120–126. <https://doi.org/10.1007/BF00696441>.
35. Vil'deman V.É., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Boundary-value problem in the mechanics of the deformation and failure of damaged bodies with yielded zones // *Journal of applied mechanics and technical physics*. – 1995. – Т. 36. – № 6. – С. 903–911. <https://doi.org/10.1007/BF02369389>.
36. Vil'deman V.E., Sokolkin Yu.V., Zaitsev A.V. Evolution of structural damage and microfailure of inhomogeneous media at the supercritical stage of deformation // *Mechanics of composite materials*. – 1997. – Т. 33. – № 3. – С. 231–237. <https://doi.org/10.1007/BF02256080>.
37. Sokolkin Yu.V., Vil'deman V.E., Zaitsev A.V., Rochev I.N. Structural damage accumulation and stable postcritical deformation of composite materials // *Mechanics of composite materials*. – 1998. – Т. 34. – № 2. – С. 171–177. <https://doi.org/10.1007/BF02256036>.
38. Соколкин Ю.В., Паньков А.А. Электроупругость пьезокомпозитов с нерегулярными структурами. – М.: Физматлит, 2003. – 176 с.
39. Pan'kov A.A., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Singular approximation of the method of periodic components in statistical mechanics of composite materials // *Mechanics of composite materials*. – 1997. – Т. 33. – № 4. – С. 322–331. <https://doi.org/10.1007/BF02256282>.
40. Соколкин Ю.В., Паньков А.А. Сингулярное приближение метода периодических составляющих для дисперсий деформаций фаз // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2001. – Т. 7. – № 4. – С. 427–433.
41. Паньков А.А., Соколкин Ю.В. Решение краевой задачи электроупругости для пьезоактивных композитов методом периодических составляющих // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2002. – Т. 8. – № 3. – С. 365–384.
42. Паньков А.А., Соколкин Ю.В. Влияние геометрии эллипсоидальных пор на свойства и распределение полей деформирования в пьезокерамике // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 87–95.
43. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках. – М.: Физматлит, 2007. – 175 с.
44. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Динамическое поведение толстостенного цилиндра при наддуве // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2002. – № 4. – С. 14–16.
45. Козлова А.В., Модорский В.Я., Соколкин Ю.В., Поник А.Н. Численное моделирование процессов смешения и охлаждения потоков в перфорированном газоходе // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2014. – № 2. – С. 54–58. <https://doi.org/10.3103/S1068799814020111>.

46. Бондаренко С.А., Ефремов А.Н., Мерзляков С.Н., Соколкин Ю.В., Модорский В.Я., Козлова А.В. Численное моделирование газодинамических процессов в каналах сложной формы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 3. – С. 92–96.
47. Сатюков В.А., Соколкин Ю.В. Технологическая механика топливных магистралей жидкостных ракетных двигателей. – М.: Физматлит, 2009. – 142 с.
48. Sokolkin Yu.V., Makarova E.Yu. Stochastic models of composite mechanics in the problems of designing structural elements in aerospace engineering // Mechanics of composite materials. – 2002. – Т. 38. – № 5. – С. 387–396. <https://doi.org/10.1023/A:1020926024506>.
49. Makarova E.Yu., Sokolkin Yu.V. Nonlinear multilevel models for composite deformation and fracture mechanics // Composites: Mechanics, Computations, Applications. – 2013. – Т. 4. – № 3. – С. 225–237.
50. Babushkin A.V., Sokolkin Y.V., Chekalkin A.A. Fatigue resistance of structurally inhomogeneous powdered materials in a complex stress-strain state // Mechanics of composite materials. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9387-1>.
51. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Соколкин Юрий Викторович (1938-2020) [Электронный ресурс] – URL: <https://pstu.ru/files/2/file/kafedra/akf/mkmk/Sokolkin.pdf> (дата обращения 02.03.2024).

SCIENTIFIC HERITAGE OF YU.V. SOKOLKIN

Tashkinov A.A., Chekalkin A.A.

Perm National Research Polytechnic University

For citation:

Tashkinov A.A., Chekalkin A.A. Scientific heritage of Yu.V. Sokolkin // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 1. – P. 72–81. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.1.9>

Yu.V. Sokolkin (1938–2020) is an outstanding Russian scientist, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Honored Scientist of the Russian Federation. The article provides an overview of the main results of his scientific activities in the field of mechanics of composite materials and structures, physical and mathematical modeling, aerospace engineering and high technologies. The titles of the sections of this article, with the exception of the first, correspond to the titles of scientific monographs with his participation, presented in chronological order; the first section of the review is devoted to the content of his dissertation work carried out by him at the Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Each section of the article, in addition to a link to the bibliographic description of the scientific monograph, also contains links to articles with Yu.V. Sokolkin's participation, where the scientific results presented in the corresponding monograph were partially published or further developed. Since Professor Sokolkin is the author of more than one hundred and fifty scientific papers, this review is not complete and comprehensive. The purpose was to reflect precisely those areas that have received undoubted recognition from the scientific community, have found practical application and are being successfully used at present, have become the basis for dissertations completed by his followers.

Keywords: mechanics of composite materials, physical and mathematical modeling, aerospace engineering, high technologies.

Сведения об авторах

Ташкинов Анатолий Александрович, профессор, доктор физико-математических наук, ректор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет («ПНИПУ»), 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; e-mail: tash@pstu.ru

Чекалкин Андрей Алексеевич, профессор, доктор физико-математических наук, декан факультета повышения квалификации преподавателей, «ПНИПУ»; e-mail: A.A.Chekalkin@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 25.03.2024 г.

Учредитель журнала
«ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА»
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(Регистрационный номер ПИ № ФС77-74977 от 01.02.2019 г.)

Выход в свет 08.05.2024. Формат 60×90/8. Бумага ВХИ 80 г/м².
Гарнитура Таймс. Печать электрографическая. Усл. печ. л. 10,25.
Тираж 500 экз. Цена свободная. Заказ №154245.

Адрес учредителя, издателя и редакции: 614000, г. Пермь, ул. Ленина, д.13а,
тел.: (342) 212-43-75, e-mail: vestnik@permisc.ru,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный
исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Информация о подписке
Журнал выходит раз в квартал. Индекс в каталоге АО «Почта России» – ПП975.

Отпечатано в типографии ООО «Ай Кью Пресс»
614046, г. Пермь, ул. Барамзиной, 42/3, тел.: +7 (342) 240-36-70
e-mail: zakaz@iqpress.ru, <http://iqpress.ru>

12+