

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

№ 4 ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ 2024

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

Главный редактор

академик РАН *В.П. Матвеевко*

Редакционная коллегия

академик РАН *А.А. Барях*
академик РАН *Н.В. Зайцева*
академик РАН *И.Б. Ившина*
академик РАН *А.А. Иноземцев*
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. физ.-мат. наук *А.Г. Воудинова*

Адрес редакции журнала:

614000, г. Пермь, ул. Ленина, 13А
13А тел.: (342) 212-51-76
e-mail: vestnik@permsc.ru

PERM FEDERAL RESEARCH CENTER JOURNAL

№ 4 OCTOBER – DECEMBER 2024

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

Editor-in-Chief

Academician *V.P. Matveenko*

Editorial Board

Academician *A.A. Baryakh*

Academician *N.V. Zaytseva*

Academician *I.B. Ivshina*

Academician *A.A. Inozemtsev*

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. (Phys.&Math.) *A.G. Votina*

Editorial office address:

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

tel.: (342) 212-40-64

e-mail: vestnik@perm-sc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 4/2024

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Денисов М.С.

Тритерпеноиды: природные соединения с высоким фармацевтическим потенциалом 6

Банникова И.А., Савельева Н.В.

Исследование статистики фрагментации природных материалов в лабораторных условиях 18

Агеева М.В., Голдобин Д.С.

Влияние дискретности синаптических сигналов на динамику сбалансированных нейронных сетей 39

ЭТЮДЫ О НАУКЕ

Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Файнбург Г.З.

Пермская школа рудничной аэрологии и её вклад в развитие теории и практики проветривания подземных горных выработок рудных шахт. . . . 50

Любимова Т.П., Костарев К.Г., Денисова М.О.

Полимеризация в космосе. Пермский период 61

ПОРТРЕТ УЧЕНОГО

Адамов А.А., Шардаков И.Н.

Кузнецов Геннадий Борисович: учитель, наставник, коллега 83

ИЗ ИСТОРИИ РОДНОГО КРАЯ

Вайман Д.И., Чернышева Ю.С.

Экспедиции по выявлению и фиксации объектов нематериального этнокультурного достояния России в 2023 году 90

CONTENTS

OCTOBER – DECEMBER 4/2024

RESEARCH: THEORY AND EXPERIMENT

Denisov M.S.

Triterpenoids: natural compounds with high pharmaceutical potential 6

Bannikova I.A., Saveleva N.V.

Investigation of fragmentation statistics of natural materials in laboratory conditions 18

Ageeva M.V., Goldobin D.S.

Influence of discrete synaptic signals on the dynamics of balanced neural networks 39

ETUDES OF SCIENCE

Levin L.Yu., Zaitsev A.V., Fajnburg G.Z.

Perm school of mine aerology and its contribution to the development of the theory and practice of ventilation of underground ore mines. 50

Lyubimova T.P., Kostarev K.G., Denisova M.O.

Polymerization in space. Permian period 61

PORTRAIT OF THE SCIENTIST

Adamov A.A., Shardakov I.N.

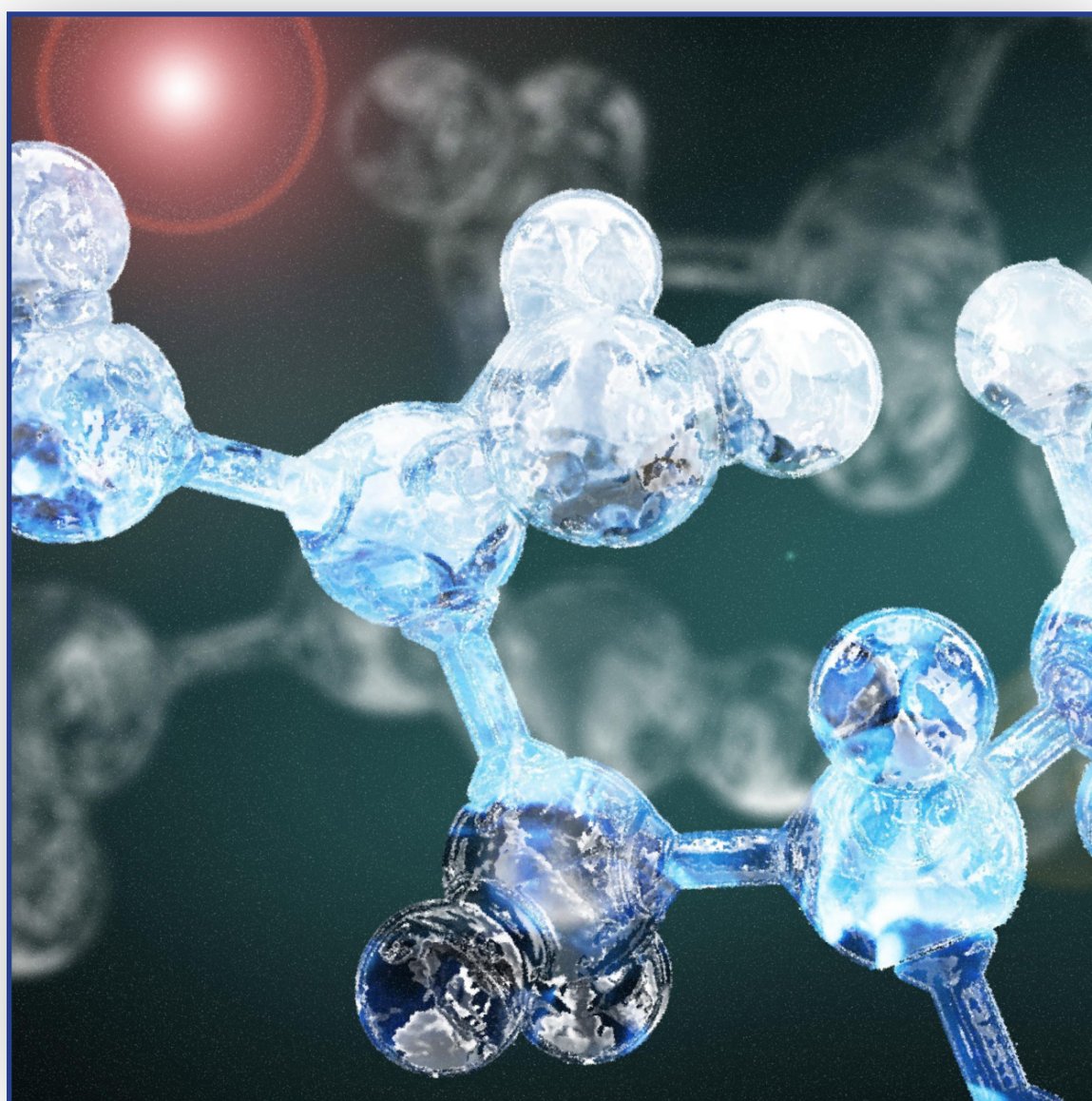
Gennady Borisovich Kuznetsov: teacher, mentor, colleague 83

FROM THE HISTORY OF THE NATIVE LAND

Vaiman D. I., Chernysheva Yu. S.

Expeditions to identify and record objects of intangible ethnocultural heritage of the peoples of Russia in 2023. 90

***ИССЛЕДОВАНИЯ:
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ***



ТРИТЕРПЕНОИДЫ: ПРИРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ВЫСОКИМ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ*

М.С. Денисов, *Институт технической химии УрО РАН*

Для цитирования:

Денисов М.С. Тритерпеноиды: природные соединения с высоким фармацевтическим потенциалом // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 6–17. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.1>

Тритерпеноиды – это класс природных соединений, характеризующихся широким спектром биологической активности и значительным потенциалом в различных областях, таких как фармацевтика и косметика. Они представляют собой органические соединения, состоящие из углерода, водорода, кислорода и других гетероатомов и могут быть найдены в различных растениях, таких как солодка, оливковое дерево и береза. Тритерпеноиды выполняют различные функции в природе, включая защиту растений от патогенов и вредителей, а также от негативных факторов окружающей среды. Они могут быть предшественниками гормонов растений и играть важную роль в росте и развитии растений. В животном мире тритерпеноиды могут играть роль в коммуникации растений с животными, например, в размножении растений за счет привлечения опылителей и защите растений от насекомых. Тритерпеноиды имеют противовоспалительные, антиоксидантные, антимикробные и другие фармакологические свойства, что делает их полезными при лечении различных заболеваний, таких как рак, воспаление и инфекционные заболевания. В будущем исследования в области химии тритерпеноидов могут быть направлены на разработку новых методов экстракции и очистки тритерпеноидов, химической модификации тритерпеноидов с целью получения веществ с улучшенными или новыми свойствами, а также на разработку новых косметических и фармацевтических продуктов на основе тритерпеноидов.

Ключевые слова: тритерпеноиды, биосинтез, структура, экстракция, хроматография, биологическая активность.

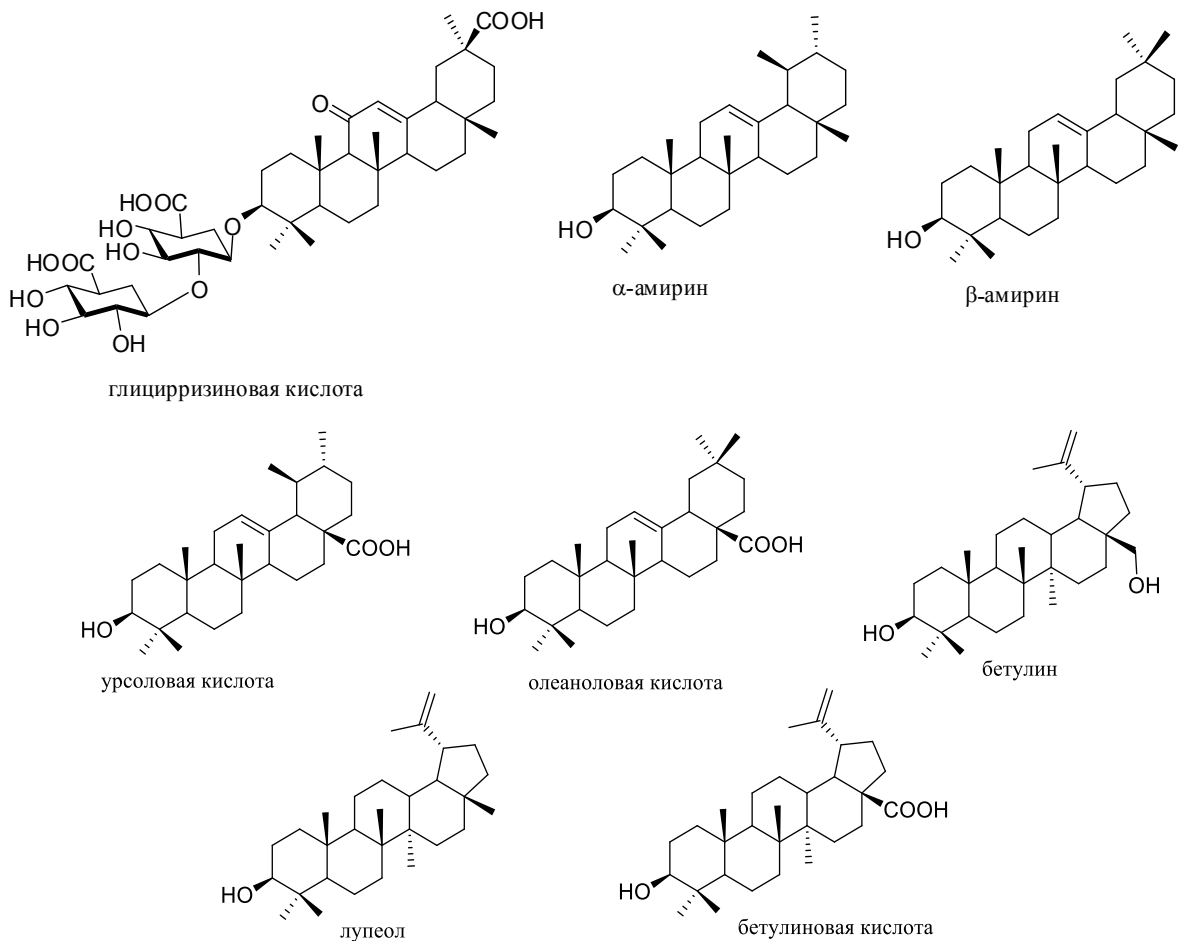
Тритерпеноиды представляют собой класс природных соединений, состоящих из шести изопреновых единиц, связанных в циклическую структуру. Они являются важной группой природных продуктов, обладающих широким спектром

* Работа выполнена в рамках государственного задания «Развитие селективных методов трансформации доступных тритерпеноидов и гетероциклов для получения биологически активных соединений»; номер государственной регистрации темы 124021400012-1.

биологической активности. Тритерпеноиды выполняют различные функции в природе, включая защиту растений от патогенов и вредителей, а также от отрицательных факторов окружающей среды, таких как солнечное излучение и засуха.

Кроме того, некоторые тритерпеноиды участвуют в общении между растениями и другими организмами. Они также могут выступать предшественниками гормонов растений и играть важную роль в росте и развитии растений. В животном мире тритерпеноиды могут принимать участие в коммуникации растений с животными, например, в размножении растений за счет привлечения опылителей и защите растений от насекомых.

В природе тритерпеноиды распространены достаточно широко. Так, в корнях и корневищах растения *Glycyrrhiza glabra* (солодка) содержится до 25% тритерпеноидного гликозида: глицирризинового гликозида: глицирризиновая кислота. В растениях рода *Ammi* из семейства *Apiaceae* (зонтичные) в составе корней и эпикутикулярного воска, покрывающего внешнюю поверхность кутикулы растения, содержится смесь тритерпеноидных гликозидов (сапонины), при гидролизе которых образуются тритерпеноиды α - и β -амирин в количестве до 0.8 и 0.3%, соответственно, от сухой массы листьев. В составе различных частей дерева *Eucalyptus globulus* (эвкалипт шаровидный) содержатся урсоловая



и олеаноловая кислоты с наибольшей концентрацией в листьях. Суммарное содержание всех тритерпеноидов достигает 89% от сухой массы листвы эвкалипта. В бересте дерева *Betula* (береза) содержится бетулин (до 30%) и лупеол (менее 1%), а в корнях – бетулиновая кислота (менее 1%) [1,2].

Химия тритерпеноидов является предметом исследований многих экспериментальных и обзорных работ. В обзоре [3] авторы анализируют роль тритерпеноидов в открытии и разработке лекарственных средств. Подчеркивается разнообразие биологической активности тритерпеноидов и их потенциал в лечении различных заболеваний, таких как рак, воспаление и инфекционные заболевания. В работах [4, 5] авторы рассматривают биосинтез, химическую структуру и биологическую активность тритерпеноидов. В работе [6] обсуждается применение тритерпеноидов в фармацевтике, включая их использование в качестве активных ингредиентов в лекарственных препаратах. Авторы обзора [7] обсуждают биологическую активность тритерпеноидов, выделенных из *Lonicera Linn* (жимолость каприфолиолистная), включая их антиоксидантную, противовоспалительную и противораковую активность. В области медицинской химии значительный вклад в изучение тритерпеноидов внесли несколько научных групп. Группа под руководством Дугласа Кингхорна специализируется на исследовании цитотоксических тритерпеноидов, извлекаемых из растений [8]. Группа, возглавляемая Симоне Фульда, занимается изучением модуляции апоптоза с использованием природных соединений в рамках терапии рака [9]. Роза Му Пук и её коллеги изучают антиканцерогенную активность лупановых тритерпеноидов [10]. Группа, возглавляемая Рене Чук, разрабатывает методы химической моди-

фикации тритерпеноидов с целью увеличения противораковой активности [11]. Группа, включающая Павла Красутского, изучает токсичность тритерпеноидов в отношении нормальных клеток, так как она мешает внедрению тритерпеноидов в качестве анти-ВИЧ препаратов [12]. В России химия тритерпеноидов является популярным направлением в медицинской химии, в котором активно работают научные группы под руководством Виктории Гришко [13-16], Оксаны Казаковой [17], Любови Снегур [18], Анны Спивак [19] и Эльвиры Шульц [20,21], продолжающие наработки научной школы академика РАН Генриха Александровича Толстикова [22]. Эти коллективы изучают различные аспекты биологической активности тритерпеноидов, их механизмы действия и потенциальное применение в онкологии. В целом, приведенные выше обзоры дают общее представление о химии тритерпеноидов, их биосинтезе, структуре и биологической активности.

Строение и классификация тритерпеноидов

Тритерпеноиды представляют собой класс органических соединений, состоящих из углерода (C), водорода (H) и некоторых гетероатомов, таких как кислород (O), азот (N) и сера (S). Большинство тритерпеноидов характеризуются наличием 30 атомов углерода, однако некоторые из них могут содержать больше или меньше атомов углерода в зависимости от их структурной организации.

Тритерпеноиды образуются из шести изопреновых единиц (C_5H_8), которые могут быть связаны между собой в различные циклические структуры. Функционализация тритерпеноидов может происходить с помощью различных групп, таких как гидроксильные, карбоксильные, альдегидные, кетонные и другие, которые могут находиться в различ-

ных положениях в циклической структуре. Кроме того, тритерпеноиды могут быть связаны с сахарами или другими группами, образуя гликозиды или эфиры.

Классификация тритерпеноидов может быть проведена по различным критериям, одним из которых является число карбоксильных групп и наличие дополнительных гетероатомов. Например, урсоловая и олеаноловая кислоты содержат карбоксильную группу в положении 17-С. Некоторые тритерпеноиды, такие как глицирризиновая кислота и другие сапонины, обладают множеством гидроксильных групп в составе гликозидного фрагмента. Кроме того, некоторые сапонины содержат сульфатные группы.

Методы получения тритерпеноидов

Методы получения тритерпеноидов из природных источников включают экстракцию, хроматографию и другие методы разделения, выделения и очистки. Выбор метода зависит от типа тритерпеноида, источника, доступных ресурсов и необходимой чистоты продукта.

Экстракция тритерпеноидов из корней солодки (*Glycyrrhiza glabra*) является одним из примеров получения глицирризиновой кислоты, которая обладает противовоспалительными и противовирусными свойствами [23]. Для ее получения корни солодки измельчают и экстрагируют горячей водой или водно-спиртовой смесью. После экстракции раствор фильтруют и выпаривают для удаления растворителя. Получаемый экстракт содержит глицирризиновую кислоту, а также другие растворимые вещества, такие как сахара и белки.

Выделение урсоловой кислоты из листьев оливкового дерева (*Olea europaea*) является другим примером получения тритерпеноида с противовоспалительными и антиоксидантными свойствами [24]. Для выделения урсоловой кислоты листья

оливкового дерева экстрагируют спиртом или водно-спиртовой смесью. После экстракции раствор фильтруют. Фильтрат подвергают хроматографии на колонке с силикагелем или гидрофильными полимерами элюированием смесью хлороформ/метанол. Урсоловую кислоту окончательно очищают методом перекристаллизации.

Метод препаративной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) является современным методом хроматографии, который может быть использован для выделения и очистки тритерпеноидов из сложных образцов. Например, урсоловая кислота может быть выделена из листьев оливкового дерева методом ВЭЖХ с использованием колонки с обратной фазой и мобильной фазой, содержащей смесь водного раствора фосфатного буфера и ацетонитрила [25].

Выделение β -амирина из корней растения *Ammi visnaga* является примером получения тритерпеноида с антимикробными и противовоспалительными свойствами [26]. Для выделения β -амирина корни растения экстрагируют спиртом или водно-спиртовой смесью. После экстракции раствор фильтруют и подвергают хроматографии на колонке с силикагелем или гидрофильными полимерами элюированием смесью гексан/этилацетат. β Амирин окончательно очищают методом перекристаллизации.

Некоторые тритерпеноиды могут быть выделены и очищены методом кристаллизации без предварительной хроматографии. Например, олеаноловая кислота может быть выделена из корней растения *Oleanthus fragrans* методом экстракции спиртом, а затем кристаллизации из спиртового раствора [27]. Другим примером является выделение бетулина из коры березы. Для выделения бетулина из коры березы, кору измельчают и экстрагируют кипящим 85% изопропиловым спиртом. Горячий экстракт фильтруют,

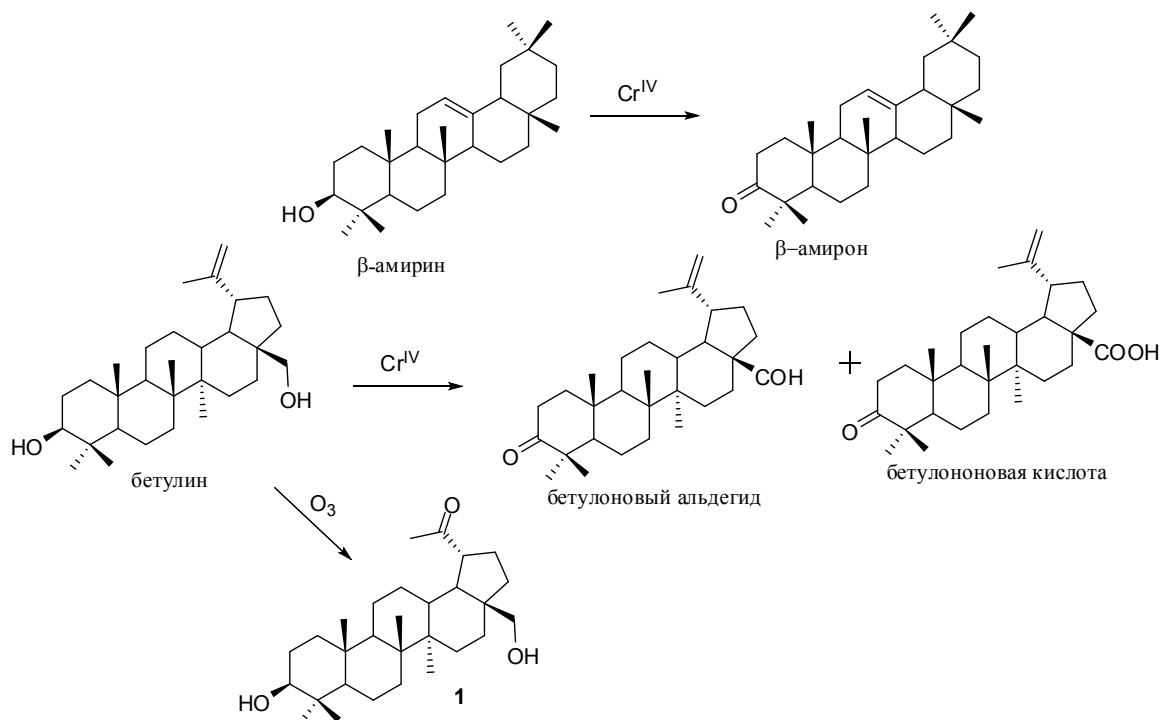
при охлаждении из полученного фильтра-та кристаллизуется бетулин [18].

Дисперсионная жидкостная микроэкстракция (DLLME) является современным методом экстракции, который может быть использован для выделения и чистки тритерпеноидов из сложных образцов, в том числе растительных экстрактов. Например, β амирин может быть выделен из корней растения *Ammi visnaga* методом DLLME с использованием дисперсионного растворителя, такого как ацетон, и экстрагирующего растворителя, такого как хлорбензол [28].

Методы химической модификации природных тритерпеноидов позволяют изменять их структуру и свойства, что может привести к получению новых соединений с улучшенными или новыми свойствами, такими как улучшенная растворимость, биодоступность, биологическая актив-

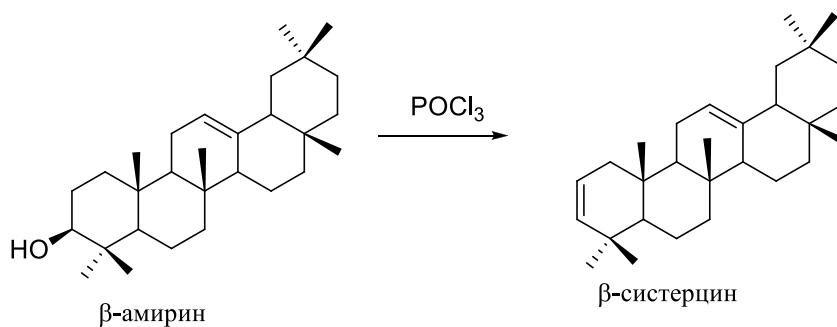
ность или стабильность. Кроме того, они могут быть использованы для структурной идентификации природных тритерпеноидов и изучения их биосинтеза [29].

Окисление соединениями шестивалентного хрома (Cr(VI)) происходит по гидроксильным группам с сохранением углеродного скелета. Гидроксильная группа может быть окислена в кетогруппу, например, превращение β -амирина в β -амирон в уксусной кислоте; в альдегидную группу, например, превращение бетулина в бетулоновый альдегид в ацетоне при 0°C; в карбоксильную группу, например, превращение бетулина в бетулоновую кислоту в ацетоне при 20°C. Примером окисления с разрушением углеродного скелета является окисление озоном (O₃): озонлиз бетулина приводит к разрыву кратной связи C-20 C-29 с образованием кетона по C-20 1.



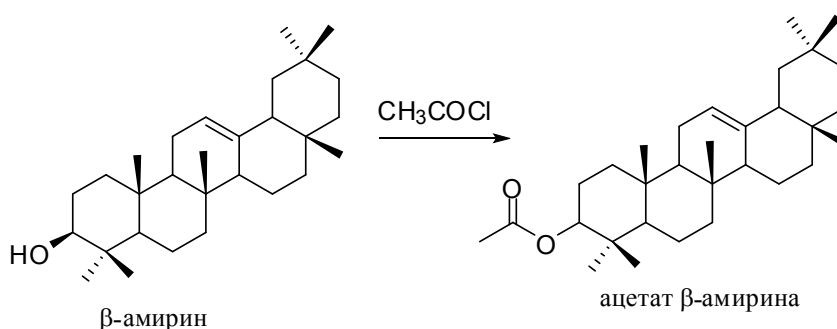
Если гидроксильная группа в составе тритерпеноида непосредственно связана с тритерпеноидным углеродным скелетом, то возможна дегидратация с образованием

кратной связи. Например, β -амирин может быть дегидратирован с помощью оксихлорида фосфора (POCl₃) в пиридине до β стерцина.



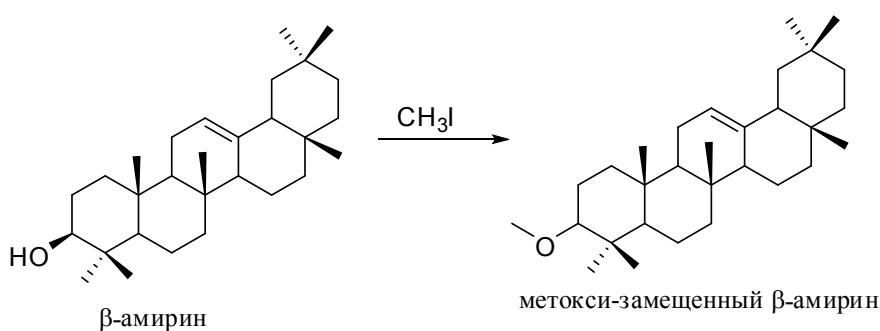
Гидроксильные группы в природных тритерпеноидах могут быть ацелированы с помощью ацетилхлорида или ацетатов в присутствии оснований, что приводит к

образованию ацетатных эфиров. Например, β амирин может быть ацелирован с помощью ацетилхлорида в пиридине, что приводит к образованию ацетата β-амирина.



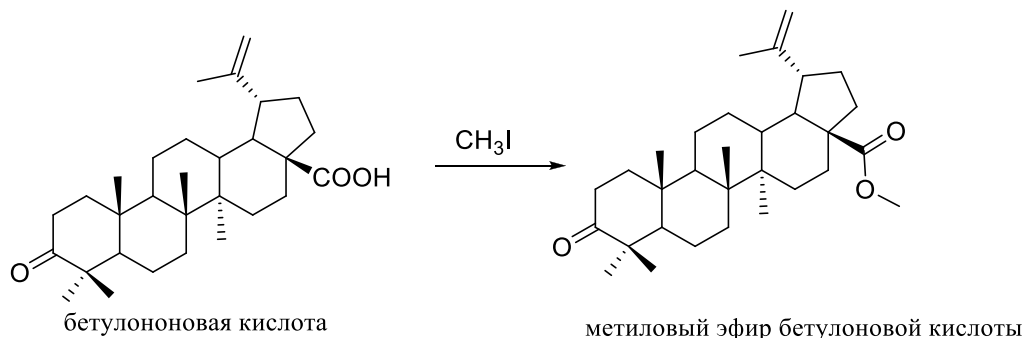
Гидроксильные группы в природных тритерпеноидах могут быть алкилированы с помощью алкилгалогенидов в присутствии основания, что приводит к образованию алкоксипроизводных.

Например, β-амирин может быть алкилирован иодметаном (CH₃I) в присутствии калия карбоната (K₂CO₃), что приводит к образованию метокси-замещенного β амирина.



Карбоксильные группы в тритерпеноидах также могут быть этерифицированы с помощью алкилиодидов, что приводит к образованию сложноэфирных производных. Например, бетулоно-

вая кислота может быть этерифицирована с помощью CH₃I в ацетоне в присутствии K₂CO₃, что приводит к образованию метилового эфира бетулоновой кислоты.



Биологическая активность и применение тритерпеноидов

Использование тритерпеноидов растительного происхождения в качестве активных ингредиентов в фармацевтических и косметических продуктах (кремах и гелях) основано на их противовоспалительных, антиоксидантных, антимикробных и других фармакологических свойствах.

Экстракты из растений, содержащих тритерпеноидные соединения, используются для увлажнения кожи и профилактики старения. Например, экстракт масла розмарина, содержащий урсоловую кислоту, может быть использован в косметических продуктах для увлажнения кожи, уменьшения воспаления и предотвращения признаков старения [30]. Экстракт *S. chinensis* (повилика китайская), содержащий тритерпеноид zingibroside R1, структурно похожий на глицирризиновую кислоту, увеличивал продолжительность жизни червей *S. elegans* [31]. Лупеол тоже может замедлять фотостарение [32].

Бетулин продается в аптеках РФ как БАД, обладающая гепатопротекторным и иммуностимулирующим действием [33] и, вероятно, помогающая в борьбе против рака лёгкого [34].

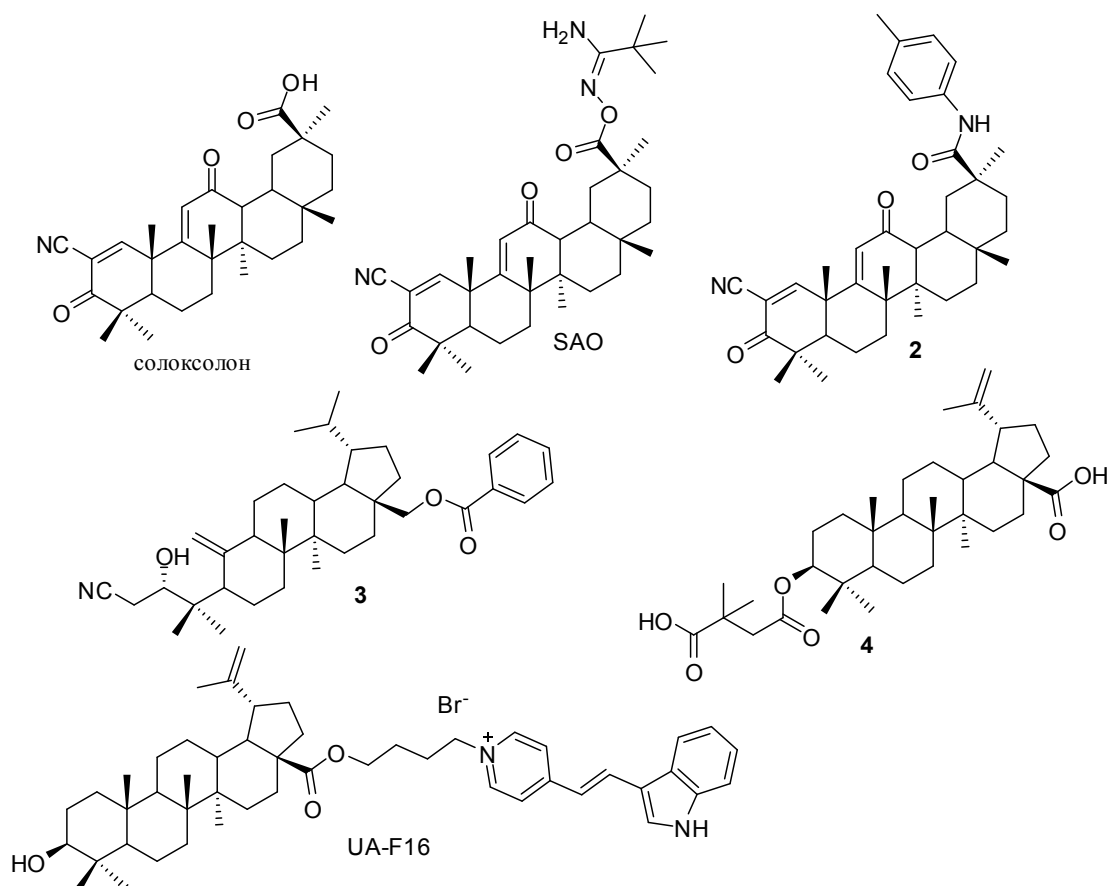
Кроме того, тритерпеноиды могут быть использованы для лечения кожных заболеваний, таких как акне и экзема. Например, корень солодки содержит глицирризиновую кислоту и другие вещества, обладающие противовоспалительными и противомикробными свойствами, которые могут быть полезны для лечения экземы. Экстракт корня солодки может быть использован в косметических продуктах для уменьшения зуда и воспаления кожи при экземе [35].

Известен ряд полусинтетических тритерпеноидов, проявляющих выраженную противовоспалительную, противовирусную и противоопухолевую активность. В частности, модифицированный по С-30 амидоксимом тритерпеноид солоксолон (SAO) продемонстрировал значительную активность на мышинной модели острого воспаления. Согласно результатам исследования [36], производные солоксолон могут рассматриваться как перспективные противовоспалительные агенты с многоцелевым механизмом действия. Другое производное солоксолон, соединение **2**, на мышинной модели показало обнадеживающий фармакологический потенциал в качестве компонента комбинированной терапии глиобластомы, снижающего инвазивность опухоли и повышающего чувствительность опухоли к химиотерапии [37]. Соединение **3**, схожее по структуре с солоксолон, является синтетическим производным бетулина. Квантово-химические расчеты и эксперименты на клеточной культуре HeLa-V (рак шейки матки) показали, что синтезированное соединение эффективно ингибирует тирозил-ДНК-фосфодиэстеразу, ключевой фермент для восстановления повреждений ДНК в процессе химиоте-

рапии [13]. UA-F16, производное бетулиновой кислоты, модифицированное стильбеновой пиридиновой солью, проявляет цитотоксическую селективность в отношении клеточной линии рака MCF-7. Это достигается путем селективного усиления образования активных форм кислорода в митохондриях опухолевых клеток, а не в здоровых клетках [19]. Фармацевтическая субстанция, Bevirimat, являющаяся одной из солей кислоты **4**, также полученной путем модификации бетулиновой кислоты, запатентована как лекарственное средство против ВИЧ [38].

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что разработки в области химии тритерпеноидов имеют значительный потенциал для открытия новых соединений с улучшенными или новыми свойствами, которые могут быть использованы в различных областях, включая медицину и косметику. В последние годы было проведено множество исследований по химии тритерпеноидов, включая их синтез, установление структуры и биологическую активность [39-42].



В будущем исследования в области химии тритерпеноидов могут включать следующие направления:

1. Разработка новых методов экстракции и очистки тритерпеноидов из природных источников, включая использование современных методов хроматографии и экстракции [18], что может привести к получению более чистых и эффективных соединений.

2. Разработка новых методов химической модификации тритерпеноидов с улучшенными или новыми свойствами, такими как повышенная растворимость, биодоступность или биологическая активность, что может расши-

рить спектр их применения.

3. Разработка новых косметических и фармацевтических продуктов на основе тритерпеноидов, включая кремы, гели и другие продукты для ухода за кожей и волосами, что может привести к созданию инновационных продуктов с улучшенными свойствами.

4. Продолжение исследований биологической активности тритерпеноидов и их потенциального применения в медицине, включая лечение различных заболеваний, таких как рак [13, 19, 35], воспаление [34] и инфекционные заболевания [43], что может привести к открытию новых способов лечения.

Библиографический список

1. *Oliveira C.S.D., Moreira P., Cruz M.T., Pereira C.M.F., Silva A.M.S., Santos S.A.O., Silvestre A.J.D.* Exploiting the Integrated Valorization of Eucalyptus globulus Leaves: Chemical Composition and Biological Potential of the Lipophilic Fraction before and after Hydrodistillation // *International Journal of Molecular Sciences.* – 2023. – Vol. 24. – P. 6226. <https://doi.org/10.3390/ijms24076226>
2. *Viet T.D., Xuan T.D., Anh L.H.* α -Amyrin and β -Amyrin Isolated from *Celastrus hindsii* Leaves and Their Antioxidant, Anti-Xanthine Oxidase, and Anti-Tyrosinase Potentials // *Molecules.* – 2021. – Vol. 26. – P. 7248. <https://doi.org/10.3390/molecules26237248>
3. *Ge J., Liu Zh., Zhong Zh., Wang Li., Zhuo X., Li J., Jiang X., Ye X.-Ya., Xie T., Bai R.* Natural terpenoids with anti-inflammatory activities: Potential leads for anti-inflammatory drug discovery // *Bioorganic Chemistry.* – 2022. – Vol. 124. – P. 105817. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.105817>
4. *Sunar P., Dasgupta R.K., Roy S.D., Shil D.* A Review on Terpenoids Introduction // *Indian Research Journal of Pharmacy and Science.* – 2023. – Vol. 34. – P. 2807–2816.
5. *Liu J., Yin X., Kou Ch., Thimmappa R., Hua X., Xue Zh.* Classification, biosynthesis, and biological functions of triterpene esters in plants // *Plant Communications.* – 2024. – Vol. 5. – P. 100845. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.100845>
6. *Battineni J.K., Koneti P.K., Bakshi V., Boggula N.* Triterpenoids: A review // *International Journal of Research in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences.* – 2018. – Vol. 3. – P. 91–96.
7. *Fang Zh., Li J., Yang R., Fang L., Zhang Y.* A Review: The Triterpenoid Saponins and Biological Activities of *Lonicera Lin* // *Molecules.* – 2020. – Vol. 25. – P. 3773. <https://doi.org/10.3390/molecules25173773>
8. *Ren Yu., Kinghorn A.D.* Natural Product Triterpenoids and Their Semi-Synthetic Derivatives with Potential Anticancer Activity // *Planta Med.* – 2019. – Vol. 85. – P. 802–814. <https://doi.org/10.1055/a-0832-2383>
9. *Fulda S.* Modulation of Apoptosis by Natural Products for Cancer Therapy // *Planta Med.* – 2010. – Vol. 76. – P. 1075–1079. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1249961>
10. *Valencia-Chan L.S., Estrada-Alfaro N., Ceballos-Cruz J.J., Torres-Tapia L.W., Peraza-Sánchez S.R., Moo-Puc R.E.* Modulation of Apoptosis by Natural Products for Cancer Therapy // *Molecules.* – 2022. – Vol. 27. – P. 8263. <https://doi.org/10.3390/molecules27238263>
11. *Denner T.C., Heise N.V., Hoenke S., Csuk R.* Synthesis of Rhodamine-Conjugated Lupane Type Triterpenes of Enhanced Cytotoxicity // *Molecules.* – 2024. – Vol. 29. – P. 2346. <https://doi.org/10.3390/molecules29102346>

12. *Carvalho F.S., Morais C.M., Holy J., Krasutsky D., Yemets S.V., Krasutsky P.A., Jurado A.S., Oliveira P.J., Serafim T.L.* Toxicity of lupane derivatives on anionic membrane models, isolated rat mitochondria and selected human cell lines: Role of terminal alkyl chains // *Chemico-Biological Interactions* – 2018. – Vol. 296. – P. 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.10.002>
13. *Tolmacheva I., Eroshenko D., Chernyshova I., Nazarov M., Lavrik O., Grishko V.* Synthesis of furanotriterpenoids from betulin and evaluation of Tyrosyl-DNA phosphodiesterase 1 (Tdp1) inhibitory properties of new semi-synthetic triterpenoids // *European Journal of Medicinal Chemistry*. – 2024. – Vol. 267. – P. 116724. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2024.116724>
14. *Tolmacheva I., Beloglazova Yu., Nazarov M., Gagarskikh O., Grishko V.* Synthesis and Anticancer Activity of A-Ring-Modified Derivatives of Dihydrobetulin // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24. – P. 9863. <https://doi.org/10.3390/ijms24129863>
15. *Moiseeva N., Eroshenko D., Laletina L., Rybalkina E., Susova O., Karamysheva A., Tolmacheva I., Nazarov M., Grishko V.* The Molecular Mechanisms of Oleanane Aldehyde- β -enone Cytotoxicity against Doxorubicin-Resistant Cancer Cells // *Biology*. – 2023. – Vol. 12. – P. 415. <https://doi.org/10.3390/biology12030415>
16. *Krainova G., Beloglazova Yu., Dmitriev M., Grishko V.* Stereoselective Epoxidation of Triterpenic Allylic Alcohols and Cytotoxicity Evaluation of Synthesized Compounds // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28. – P. 550. <https://doi.org/10.3390/molecules28020550>
17. *Смирнова И.Е., Казакова О.Б.* Изооксазоло- и 2-циано-1-еновые производные диптерокапрона с противоопухолевой активностью // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 2024. – Т. 73. – С. 2115-2220. <https://doi.org/10.1007/s11172-024-4332-5>
18. *Каверин М.В., Морозова П.А., Снегур Л.В.* Бетулин, бетулоновая кислота, 3-аминобетулиновая кислота. Улучшенный способ экстракции и препаративные синтезы производных // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 2022. – Т. 71. – С. 2236-2240. <https://doi.org/10.1007/s11172-022-3651-7>
19. *Dubinina M.V., Nedopekina D.A., Ilzorkina A.I., Semenova A.A., Sharapov V.A., Davletshin E.V., Mikina N.V., Belsky Yu.P., Spivak A.Yu., Akatov V.S., Belosludtseva N.V., Liu J., Belosludtsev K.N.* Conjugation of Triterpenic Acids of Ursane and Oleanane Types with Mitochondria-Targeting Cation F16 Synergistically Enhanced Their Cytotoxicity against Tumor Cells // *Membranes*. – 2023. – Vol. 13. P. 563. <https://doi.org/10.3390/membranes13060563>
20. *Kharitonov Yu.V., Antipova V.I., Marenina M.K., Meshkova Yu.V., Tolstikova T.G., Shults E.E.* Synthetic Transformations of Higher Terpenoids. 43. Synthesis and Cytotoxic Properties of New Lambertianic Acid Derivatives at the Carboxylic Group // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2023. – Vol. 59. – P. 1009–121. <https://doi.org/10.1007/s10600-023-04206-1>
21. *Gromova M.A., Kharitonov Yu.V., Golubeva T.S., Rybalova T.V., Shults E.E.* Synthesis and anticancer evaluation of new lupane triterpenoid derivatives containing various substituent at the 2 or 3 position // *Steroids*. – 2024. – Vol. 208. – P. 109457. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2024.109457>
22. *Толстиков Г.А., Флехтер О.Б., Шульц Э.Э., Балтина Л.А., Толстиков А.Г.* Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2005. – Т. 13. – С. 1-30.
23. *Rossello S., Mandrone M., Cerchiara T., Chiocchio I., Rossi M., Chinnici F., Sallustio V., Aponte M., Blaiotta G., Luppi B., Abruzzo A., Bigucci F., Cappadone C.* A New Wound-Healing Tool Based on Glycyrrhiza glabra Extract-Loaded Ufasomes on Spanish Broom Dressings // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29. – P. 3811. <https://doi.org/10.3390/molecules29163811>
24. *Xie P., Cecchi L., Bellumori M., Balli D., Giovannelli L., Huang L., Mulinacci N.* Phenolic Compounds and Triterpenes in Different Olive Tissues and Olive Oil By-Products, and Cytotoxicity on Human Colorectal Cancer Cells: The Case of Frantoio, Moraiolo and Leccino Cultivars (*Olea europaea* L.) // *Foods*. – 2021. – Vol. 10. – P. 2823. <https://doi.org/10.3390/foods10112823>
25. *Deng Yan, Zhou J., Wang B., Xu X., Huang T., Xu Zh., Zhao Ch.* Optimization of Different Extraction Methods for Phenolic Compound Verbascoside from Chinese *Olea europaea* Leaves Using Deep Eutectic Solvents: Impact on Antioxidant and Anticancer Activities // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29. – P. 4219. <https://doi.org/10.3390/molecules29174219>

26. Mouelle E.N.M., Nsangou M.F., Fofack H.M.Tsahnang, Mboutchak D., Koliye P.R., Ateba B.A., Ntie-Kang F., Akone S.H., Happi E.N. In Vitro and In Silico Studies of the Biological Activities of Some Secondary Metabolites Belonging to Ficus sur Forssk (Moraceae): Towards Optimization of Wighteone Metabolite // Chem Biodivers. – 2024. – e202401270. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202401270>
27. Hu F., Liao X., Guo Ya., Yamaki S., Li X., Hamada N., Hashi Yu., Chen Z. Fast determination of isomeric triterpenic acids in Osmanthus fragrans (Thunb.) Lour. fruits by UHPLC coupled with triple quadrupole mass spectrometry // Food Chemistry. – 2020. – Vol. 322. – P. 126781. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126781>
28. Peng Ch., Zhang Sh., Li X. A Novel DLLME Method Involving a Solidifying Hydrophobic Deep Eutectic Solvent Using Hydrophilic Deep Eutectic Solvent as the Dispersant for the Determination of Polychlorinated Biphenyls in Water Samples // Molecules. – 2024. – Vol. 29. – P. 3480. <https://doi.org/10.3390/molecules29153480>
29. Лаев С.С., Салахудинов Н.Ф. Препаративная химия терпеноидов в 5 ч., Ч. 3. Тритерпеноиды: лулеол, бетулин, бетулиновая кислота, олеаноловая кислота, мороновая кислота, урсоловая кислота, глициретовая кислота, босвеллиевая кислота. – Новосибирск: Академиздат, 2016. – 367 С.
30. Organisciak D.T., Darrow R.M., Rapp C.M., Smuts J.P., Armstrong D.W., Lang J.C. Prevention of retinal light damage by zinc oxide combined with rosemary extract // Molecular Vision. – 2013. – Vol. 19. – P. 1433-1445.
31. Kirchweger B., Zwirchmayr Ju., Grienke U. Rollinger Ju.M. The role of Caenorhabditis elegans in the discovery of natural products for healthy aging // Natural Product Reports. – 2023. – Vol. 40. – P. 1849-1873. <https://doi.org/10.1039/D3NP00021D>
32. Park Yo.M., Park S.N. Inhibitory Effect of Lupeol on MMPs Expression using Aged Fibroblast through Repeated UVA Irradiation // Photochemistry and Photobiology. – 2019. – Vol. 95. – P. 587-594. <https://doi.org/10.1111/php.13022>
33. Энциклопедия лекарственных препаратов РЛС. Электронный ресурс. <https://www.rlsnet.ru/baa/betulin-ocishhenyi-29254>
34. Pyo J.S., Roh SiH., Kim D.Ki, Lee J.G., Lee Yo.Yo., Hong S.S., Kwon S.W., Park J.H. Anti-Cancer Effect of Betulin on a Human Lung Cancer Cell Line: A Pharmacoproteomic Approach Using 2 D SDS PAGE Coupled with Nano-HPLC Tandem Mass Spectrometry // Planta Medica. – 2009. – Vol. 75. – P. 127-131. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1088366>
35. AlDehlawi H., Jazzar A. The Power of Licorice (Radix glycyrrhizae) to Improve Oral Health: A Comprehensive Review of Its Pharmacological Properties and Clinical Implications // Healthcare (Basel). – 2023. – Vol. 11. – P. 2887. <https://doi.org/10.3390/healthcare11212887>
36. Sen'kova A.V., Savin I.A., Odarenko K.V., Salomatina O.V., Salakhutdinov N.F., Zenkova M.A., Markov A.V. Protective effect of soloxolone derivatives in carrageenan- and LPS-driven acute inflammation: Pharmacological profiling and their effects on key inflammation-related processes // Biomedicine & Pharmacotherapy. – 2023. – Vol. 159. – P. 114231. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114231>
37. Odarenko K.V., Sen'kova A.V., Salomatina O.V., Markov O.V., Salakhutdinov N.F. Salakhutdinov, Zenkova M.A., Markov A.V. Soloxolone para-methylanilide effectively suppresses aggressive phenotype of glioblastoma cells including TGF-β1-induced glial-mesenchymal transition in vitro and inhibits growth of U87 glioblastoma xenografts in mice // Frontiers in Pharmacology. – 2024. – Vol. 15. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1428924>
38. Пауэр М.Д., Мартин Д.Ю. Патент РФ № 2387665С2 от 27.04.2010 г.
39. Денисов М.С., Ерошенко Д.В. Синтез 2-никотинилидентритерпеноидов: структура, комплексообразование с палладием и цитотоксическая активность in vitro // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2023. – Т. 72. – С. 2206-2214. <https://doi.org/10.1007/s11172-023-4017-5>
40. Денисов М.С. Синтез 2-гетероилиденов тритерпеноидов: комплексообразование с палладием и цитотоксическая активность in vitro // Журнал общей химии. – 2023. – Т. 93. – С. 106-112. <https://doi.org/10.31857/S0044460X23010122>
41. Денисов М.С., Белоглазова Ю.А., Глушков В.А. Микроволновый синтез имидазо[1,2-а]пиридинов, аннелированных с тритерпеноидами // Химия гетероциклических соединений. – 2022. – Т. 58. – С. 319-323. <https://doi.org/10.1007/s10593-022-03091-w>
42. Денисов М.С., Дмитриев М.В., Гагарских О.Н. Глушков В.А. Синтез и структурные исследования N-гетероциклических оснований Шиффа на основе аллобетулона // Химия природных соединений. – 2022. – С. 264-268. <https://doi.org/10.1007/s10600-022-03665-2>

43. Jalmakhanbetova R.I., Mukusheva G.K., Abdugalimov A.Sh., Zhumagalieva Zh.Zh., Dehaen W., Anthonissen S., Suleimen Y.M., Seidakmetova R.B. Synthesis and Investigation of Biological Activity of New Betulonic Acid Derivatives Containing 1,2,3-Triazole Fragments // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29. – P. 3141. <https://doi.org/10.3390/molecules29133149>

TRITERPENOIDS: NATURAL COMPOUNDS WITH HIGH PHARMACEUTICAL POTENTIAL

Denisov M.S.

Institute of Technical Chemistry of UB RAS

For citation:

Denisov M.S. Triterpenoids: natural compounds with high pharmaceutical potential // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2024. – No 4. – P. 6–17. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.1>

Triterpenoids are a class of natural compounds characterized by a wide range of biological activities and significant potential in various fields such as pharmaceuticals and cosmetics. They are organic compounds composed of carbon, hydrogen, oxygen and other heteroatoms, and can be found in a variety of plants such as licorice, olive tree and birch. Triterpenoids perform various functions in nature, including protecting plants from pathogens and pests, as well as from negative environmental factors. They can also be precursors to plant hormones and play an important role in plant growth and development. In the animal world, triterpenoids can play a role in plant-animal communication, such as plant reproduction by attracting pollinators and protecting plants from insects. Triterpenoids have anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial and other pharmacological properties, making them useful in the treatment of various diseases such as cancer, inflammation and infectious diseases. Future research in the field of triterpenoid chemistry may focus on the development of new methods of extraction and purification of triterpenoids, chemical modification of triterpenoids to obtain substances with improved or new properties, and the development of new cosmetic and pharmaceutical products based on triterpenoids.

Keywords: triterpenoids, biosynthesis, structure, extraction, chromatography, biological activity, pharmaceuticals, cosmetics, antitumor activity.

Сведения об авторе

Денисов Михаил Сергеевич, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории природных и биологически активных соединений, Институт технической химии УрО РАН – филиал Федерального государственного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»); 614068, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 3; e-mail: denisov.m@itctas.ru

Материал поступил в редакцию 17.10.2024 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКИ ФРАГМЕНТАЦИИ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ*

И.А. Банникова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Н.В. Савельева, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Банникова И.А., Савельева Н.В. Исследование статистики фрагментации природных материалов в лабораторных условиях // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 18–38. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.2>

Представлены результаты исследования поведения природных материалов (кварцит, песчаник, андезит) при квазистатическом, динамическом нагружении и низкоскоростном индентировании ($10^{-3} \div 10^3$ 1/с). Условия эксперимента позволили сохранить фрагментированные образцы и провести анализ статистики сохраненных фрагментов по размерам (массам). В ходе исследований использовалась система лабораторных сит и электронные весы HR-202i с погрешностью измерения 0.0001 г. Метод обработки фотографий с фрагментами позволил установить количество и массу фрагментов на ситах с размерами ячейки до 0.063-0.05 мм, не менее 99% от массы образца и минимизировать погрешность измерений. На полученных кумулятивных распределениях фрагментов по массе $N(m_i)$ наблюдается изменение формы перегиба и смещение точки перегиба в сторону меньших масштабов с увеличением скорости деформации. В ходе анализа данных отражается сходство статистики фрагментации по степенному закону и асимптотических режимов разрушения с множественными разрывами, полученными по сценарию хрупкого разрушения. Показано, что разрушение образцов происходит по разным сценариям в зависимости от условий нагружения и связано с изменением скорости перехода от одной стадии появления трещин (или накопление напряженных состояний, дефектной структуры) к другой (образование трещин и полная фрагментация). Установлено, что формирование фрагментов носит «автомодельный» характер.

Ключевые слова: статистический анализ фрагментации, кварцит, песчаник, андезит.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 20-41-596013 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. номер НИОКТР № 124020200116-1).

Введение

Статистические закономерности процесса фрагментации являются предметом устойчивого интереса в связи с изучением фундаментальных аспектов разрушения материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения [1–6]. На сегодняшний день существует большое количество исследований фрагментации в различном типе экспериментов и образцов: разрушение оболочек (или колец) [3, 4, 7–11], длинных стержней [12, 13], цилиндров [14], пластин [15, 16]. Существует множество примеров динамической фрагментации, охватывающей огромный диапазон масштабов по размеру (массе): от расщепления атомных ядер [17] до фрагментации комет [18]. Все перечисленные события произошли в результате дробления тела на некоторое число фрагментов. Вид распределения фрагментов по размеру (массе) зависит от ряда факторов: от величины энергии, затраченной на разрушение [1–6, 11], свойств материала (хрупкий или пластичный) [1, 12], формы и размерности объекта (3-х мерные – кубы, сферы, 2-х мерные – пластина, стержень).

В развитие работ по изучению пространственно-временной статистики фрагментации при нагружении цилиндрических образцов из стекла и керамик [2–4, 6, 11, 15, 16, 21, 22] в настоящей работе проведен анализ статистических распределений фрагментов образцов из природных материалов (кварцит, песок, андезит), полученных при разных типах нагружения в условиях сохранения фрагментов. Постановка задач фрагментации материалов соответствует двум различным аспектам анализа поведения материала в зависимости от величины энергетического воздействия:

1) исследование вблизи критической точки (critical point [3, 15] или transition point [23]), соответствующей переходу от

дефектного материала к фрагментированному;

2) исследование процесса фрагментации вдали от «критической точки» в условиях значительных энергетических воздействий на материал.

Оба аспекта исследований важны для полного понимания процесса разрушения материалов и разработки новых материалов с улучшенными свойствами, которые смогли бы выдержать условия нагружения, когда поглощение энергии сопровождается выраженными процессами фрагментации с различными статистическими законами [1, 6, 9, 11, 12, 16, 18, 22].

Существенным является определение параметров модели на основе лабораторных экспериментов по фрагментации конкретных образцов породы в необходимом диапазоне интенсивностей и скоростей нагружения с регистрацией статистических и кинетических закономерностей фрагментации независимыми методами (распределения фрагментов по размерам, кинетика сигналов флуоресценции, акустической эмиссии). Принципиально важными являются методы обработки статистических распределений фрагментов по размерам и кинетике разрушения, цель которых заключается в установлении закономерностей «критичности». Практическая значимость работы заключается в возможности применения её результатов в горнодобывающей отрасли, где одной из ключевых задач является определение параметров эффективного дробления (фрагментации) материалов с минимальными энергетическими затратами различными методами. Полученные данные могут способствовать оптимизации технологических процессов и улучшению производительности оборудования, что в конечном итоге приводит к снижению эксплуатационных расходов и повышению экологической безопасности.

Образцы из природных материалов и эксперимент

В работе исследовались образцы из природных материалов: кварцит (г. Уганда, Африка), песчаник (ООО «Нефтеком», Чаяндинское НГКМ скважины №1062, ствол 2, Ботуобинский горизонт, Россия и НТЦ «Газпромнефть», Ботуобинский горизонт, глубина забора 2920...2950 м, за пределами месторождения разведывательной скважины, Россия) и андезит (собран в зоне установки опор кресельной канатной дороги, на горе Эльбрус на высоте 2350 м над уровнем моря, пос. Чегет, Кабардино-Балкарская Республика, Россия). В таблице 1 приведены параметры, свойства образцов и условия нагружения.

Образцы из кварцита, песчаника и андезита разрушались в условиях сохранения фрагментов под действием квазистатического, динамического нагружения и низкоскоростного индентирования (песчаник в условиях всестороннего обжатия). Квазистатическое сжатие (quasistatic loading, QSL) и индентирование (quasistatic indention, QSInd) реализовывалось на универсальной нагружающей машине Shimadzu AGX Plus, а динамическое нагружение (dynamic loading, DL) – на установке с разрезными стержнями Гопкинсона «РСГ-25». Подробное описание методики экспериментов приведено в работах [24,25,32].

Динамическое нагружение цилиндрических образцов из песчаника проводилось в интервале скоростей нагружения от 863 1/с до 1447 1/с, в котором были получены максимальные значения напряжений от 603.8 до 44.8 МПа, оценена энергия нагружения, как площадь под деформационной кривой: для образцов San1 – 2.3 Дж, для San2 – 1.75 Дж, для San3 – 8.3 Дж и для образца San4 – 6.38 Дж. Динамическое нагружение образцов из андезита Mou3 и Mou4 проводилось

при скоростях ударника 9.8 м/с и 20.8 м/с. При достижении максимальных значений приложенных осевых сжимающих напряжений для Mou3, $\sigma_{max} = 143$ МПа, деформация $\varepsilon = 7.5 \times 10^{-3}$, скорость деформации равнялась 430 1/с (9.8 Дж), для Mou4, $\sigma_{max} = 428$ МПа, $\varepsilon = 15.3 \times 10^{-3}$, скорость деформации равнялась 1353 1/с (5.2 Дж). Разрушение кварцита при динамическом сжатии осуществлялось при достижении $\sigma_{max} = 28$ МПа, а скорости деформации 10^3 1/с.

Квазистатическое индентирование образцов из песчаника осуществлялось с помощью индентора из высокопрочной закалённой стали с сечением в виде прямоугольной пирамиды со скоростью 3 мм/с [25], значения максимальной нагружающей силы до возникновения признаков разрушения находились в интервале от 8 до 28 кН.

Квазистатическое нагружение образцов из песчаника и андезита осуществлялось при скорости движения траверсы 0.5 мм/мин, (8.3×10^{-6} м/с). Максимальные значения величины приложенного усилия перед разрушением F_{max} андезита составили 9 и 13 кН. А для образцов из песчаника – 2.8 кН с выходом на плато в критической стадии со значением 0.8...1.2 кН, что может быть связано с проявлением остаточной несущей способности материала при сжатии и компактировании трещин. Квазистатическое сжатие кварцита реализовывалось при скоростях 0.2 и 1 мм/мин, а полное разрушение кварцита происходило при достижении $F_{max} \sim 90$ и ~ 270 кН, соответственно.

На рисунках ниже приведены фотографии образцов из песчаника, андезита и кварцита после QSL (рис. 1) и QSInd (рис. 2). В ходе эксперимента установлено, что для квазистатического сжатия природных материалов характерно образование множественных магистральных трещин по высоте и в объеме образца.

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Квазистатическое индентирование песчаника сопровождалось образованием в трехстороннем ветвлении трещины от места соприкосновения с индентором и отколом одного-трех крупных фрагментов от основания образца с небольшим

количеством мелких фрагментов. После динамического нагружения образцы разрушались полностью, примеры фрагментов образцов представлены ниже, в разделе «анализ статистики фрагментации».

Таблица 1.

Образцы, параметры и условия нагружения

Образец	Метод нагружения, название образца	Диаметр <d>, мм	Высота <h>, мм	Плотность ρ , кг/м ³	Масса образца <m>, г	
Кварцит, цилиндры	QSL, 0.047÷0.390 1/с, №1, №2, №4	26.70±0.01	21.60±0.01	2700	(30.28...31.80)±0.0001	
Кварцит, цилиндры	DL, 10 ³ 1/с, №3				31.3636±0.0001	
Песчаник, цилиндры	DL, 0.9×10 ³ ÷1.4×10 ³ 1/с: San1, San2, San3, San4	10.80±0.01	10.20±0.01	2057...2600	(1.82...2.58)±0.0001	
Песчаник, цилиндры	QSL, 8.3×10 ⁻⁶ м/с, 10 ⁻³ 1/с, San5, San6				1.9777±0.0001 2.0448±0.0001	
Песчаник, цилиндры	QSInd, №San5021 и №San4821	30.10±0.01	60.10±0.01	2057...2600	(90.52...102.56)±0.0001	
Андезит, цилиндры	QSL, 8.3×10 ⁻⁶ м/с, 10 ⁻³ 1/с	Mou1	11.06±0.01	11.79±0.01	2534	2.8712±0.0001
		Mou2	11.04±0.01	10.23±0.01	2528	2.4763±0.0001
Андезит, цилиндры	DL, 0.4×10 ³ ÷1.3×10 ³ 1/с	Mou3	11.05±0.01	11.24±0.01	2553	2.7522±0.0001
		Mou4	11.06±0.01	11.48±0.01	2563	2.8278±0.0001

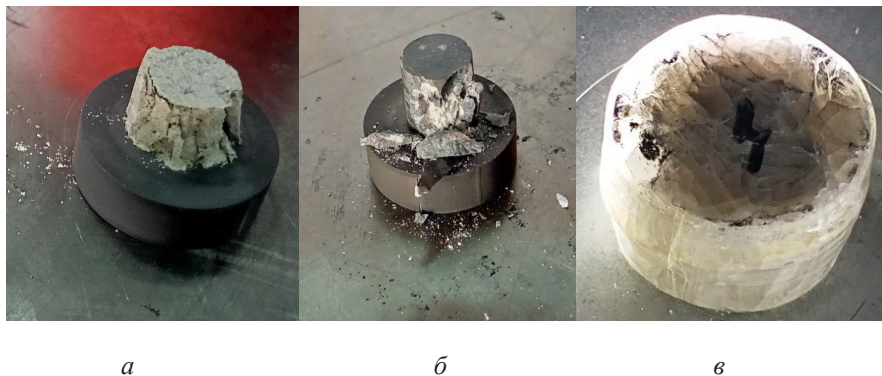


Рис. 1. Внешний вид образцов из песчаника (а), андезита (б) и кварцита (в) [24] после QSL



Рис. 2. Вид сверху «Сборки» с песчаником после испытаний – низкоскоростного индентирования [25]

Анализ статистики фрагментации

В работе проводился анализ статистики фрагментации образцов из природных материалов. В ходе исследований использовалась система лабораторных сит и электронные весы HR-202i с погрешностью измерения 0.0001 г. Фрагменты массой менее 0.01 г. анализировались с помощью «Метода фотографии» [30]. Часть фрагментов данного сита взвешивалась на весах, затем распределялась равномерно на подложке контрастного цвета и снималась цифровой камерой CANON 7D, 16.1 Mpix. Используя разработанную для ЭВМ программу, определяли количество фрагментов известной массы. Массу фрагмента в этом случае определяли как среднюю массу. А количество всех фрагментов данного сита вычисляли пропорцией. Таким образом, были посчитаны фрагменты, включая фрагменты сита с размером ячейки 0.063 мм (в некоторых случаях до 0.05 мм). Для построения кумулятивного распределения фрагментов по массе $N(m_p)$ находилось количество фрагментов больше некоторого заданного. Затем анализировали кумулятивные распределения, находя подходящую аппроксимирующую функцию на соответствующих участках кривых распределения $N(m_p)$.

На рис. 3 приведена фотография с изображением формы фрагментов песчаника (Ботубинский горизонт), характерной для режима динамического нагружения (методом разрезного стержня Гопкинсона-Кольского, «РСГ-25»). Большая по массе часть фрагментов при просеивании через систему сит находилась на первом уровне с размером грани ячейки 2.5 мм. Фрагменты отличались по форме и размеру. Начиная с 5 сита (0.4 мм) форма фрагментов песчаника напоминала октаэдры. Кумулятивные распределения фрагментов по размерам (массе) представлены на рис. 4. На распределениях присутствует небольшой перегиб. Установлено, что с увеличением энергии нагружения точка перегиба смещается в сторону меньших масштабов (показано стрелкой). Степенная функция описывает полученные распределения с наилучшей достоверностью. Показатель степени в аппроксимирующих кривых увеличивается от (-0.88) до (-0.72) с увеличением приложенного напряжения до разрушения (с 46 МПа до 604 МПа), со значениями достоверности аппроксимации $R^2 \sim 0.95 \dots 0.99$.

На рис. 5, приведен пример разбора кумулятивного распределения $N(m_p)$ образца №San4. На нем отмечены линии

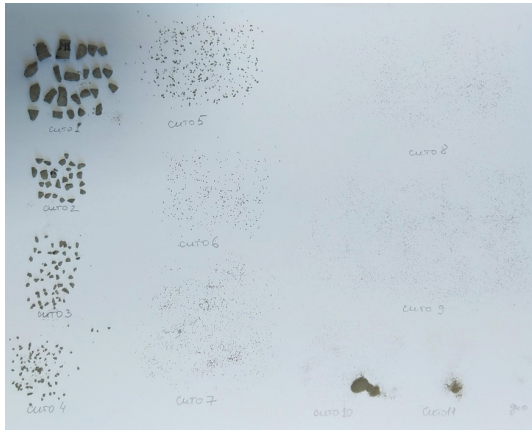


Рис. 3. Вид фрагментов образца San4, полученного в результате DL

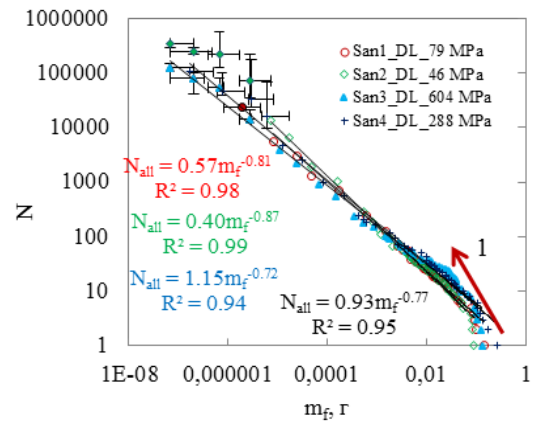


Рис. 4. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для цилиндрических образцов из песчаника, полученные в условиях динамического нагружения методом «РСТ-25»

тренда, соответствующие каждому интересующему нас участку распределения с высокой достоверностью аппроксимации R^2 . Если анализировать распределения фрагментов по размеру только мелких фрагментов с массой $m_f < 0.03$ г, то они будут описываться с $R^2 \sim 0.96$ степенной функцией с показателем степени (-0.75) , рис. 5 а. Тогда как кумулятивное распределение крупных фрагментов по массе, соизмеримых по размеру с самим образцом – $m_f > 0.03$ г, описывается как логарифмической, так и экспоненциальной функцией $\sim \exp(-11.95m)$ с $R^2 \sim 0.96$. Рассмотрим ситуацию, когда мелкие фрагменты с массой $m_f < 0.01$ г, а крупные фрагменты массой большей 0.01 г., рис. 5 б. Здесь кумулятивные распределения фрагментов для тех и других с массой будут описываться с хорошей аппроксимацией степенными функциями с соответствующими показателями степени (-0.77) с $R^2 \sim 0.95$ для мелких и (-0.97) с $R^2 \sim 0.98$ для крупных.

Ниже, на рис. 6, приведены диаграммы значений процентного соотношения массы фрагментов по каждому сити от массы образца (рис. 6, а) и от всей массы

фрагментов образца (рис. 6, б). При больших значениях приложенной нагрузки наблюдаются более равномерные распределения по массе фрагментов на верхних ситах. Диаграммы кумулятивного распределения описываются степенными законами с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 \sim 0.90 \dots 0.99$, показатель степени уменьшается $(-1.5, -1.6, -1.7, -2.2)$ с увеличением энергии нагружения (1.75; 2.3; 6.38; 8.3 Дж). Определено, что количество фрагментов образцов из песчаника в результате DL уменьшалось с увеличением энергии нагружения, что связано с возможной агрегацией составляющих образца (глины, кварцевых песчинок и т.д.).

Было предложено показать (см. на рис. 7), как изменился бы показатель A в степенных функциях $N(m_f) \sim (m_f)^A$, описывающих кумулятивное распределение всех фрагментов образцов песчаника, от напряжения σ с небольшим прогнозированием по аппроксимации от 0 до 1 ГПа. Несмотря на то, что полиномиальная функция описывает с достоверностью аппроксимации $R^2=1$, экспериментальных данных недостаточно для соответствующих выводов.

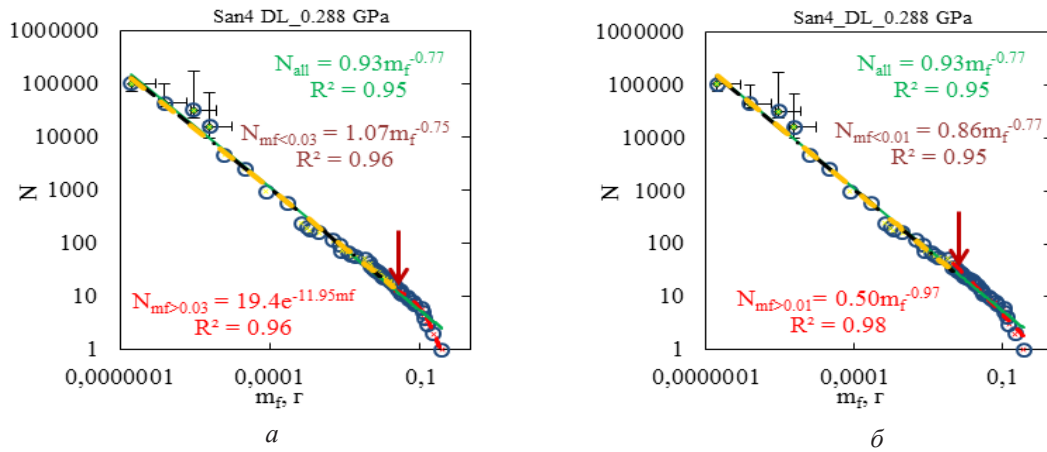


Рис. 5. Кумулятивное распределения фрагментов по массе для песчаника (San4), полученное в условиях динамического нагружения (DL). Анализ распределений для фрагментов массой больших и меньших 0.03 г (а) и 0.01 г (б)

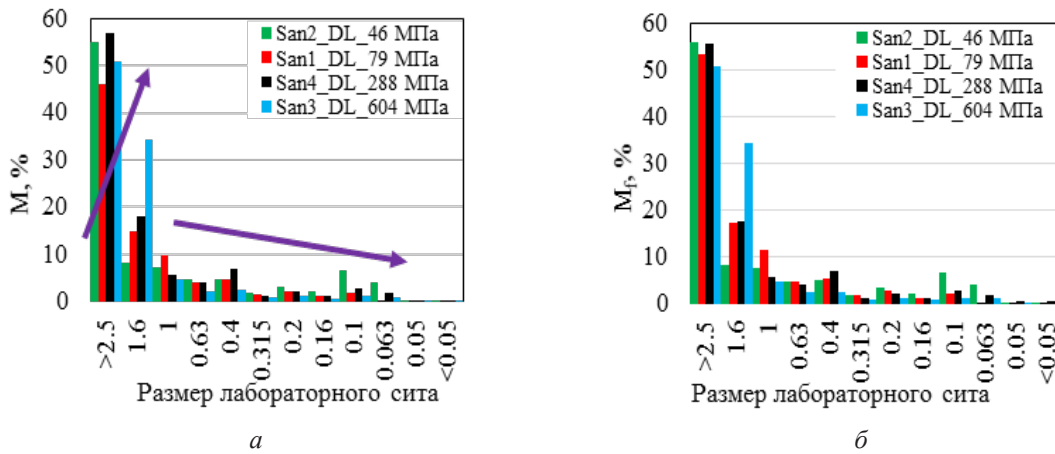


Рис. 6. Диаграмма изменения массы фрагментов песчаника в процентном соотношении от массы образца (а) и от массы всех фрагментов образца (б) по каждому сити. Динамическое нагружение

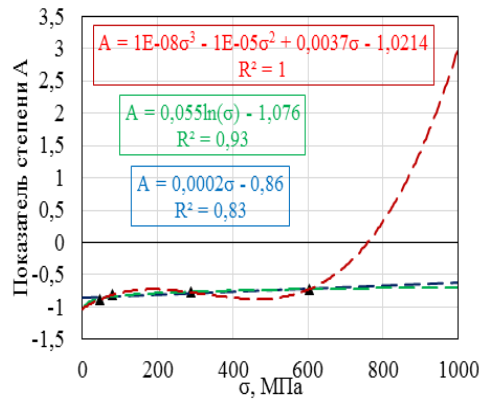


Рис. 7. Изменение значения показателя A в степенной функции от напряжения σ с прогнозированием по аппроксимации от 0 до 1 ГПа

Проанализируем статистику фрагментации цилиндрических образцов из песчаника (Ботубинский горизонт) и андезита (подножие г. Эльбрус, пос. Чегет) после квазистатического сжатия. Масса фрагментов составила не менее 98% от массы образца. Ниже приведены кумулятивные распределения фрагментов по массе $N(m_f)$ для песчаника после QSL (рис. 8). Перегиб распределений смещается в сторону меньших масштабов. Все распределение можно аппроксимировать одной степенной функцией с высокой достоверностью R^2 . Рассмотрев по отдельности фрагменты с массой большей и меньшей 0.01 г, убеждаемся, что кумулятивные распределения $N(m_f)$ хорошо опи-

сываются степенной функцией. Ситуация меняется, если рассматривать фрагменты с массой большей-меньшей 0.03 г, когда размер фрагментов соизмерим с размером образца (сито с размером 2.5 мм). Фрагменты песчаника с $m_f < 0.03$ г можно описать степенной функцией с $R^2 \sim 0.99$, а с $m_f > 0.03$ г – логарифмической с $R^2 \sim 0.95$ (или степенной, но с $R^2 \sim 0.88$). То есть достоверность аппроксимации снижается при описании степенными функциями при увеличении границы по массе (большой-маленький). На фотографиях ниже (рис. 9) показана характерная форма фрагментов образцов из песчаника (рис. 9, а), андезита (рис. 9, б), полученных в результате квазистатического нагружения.

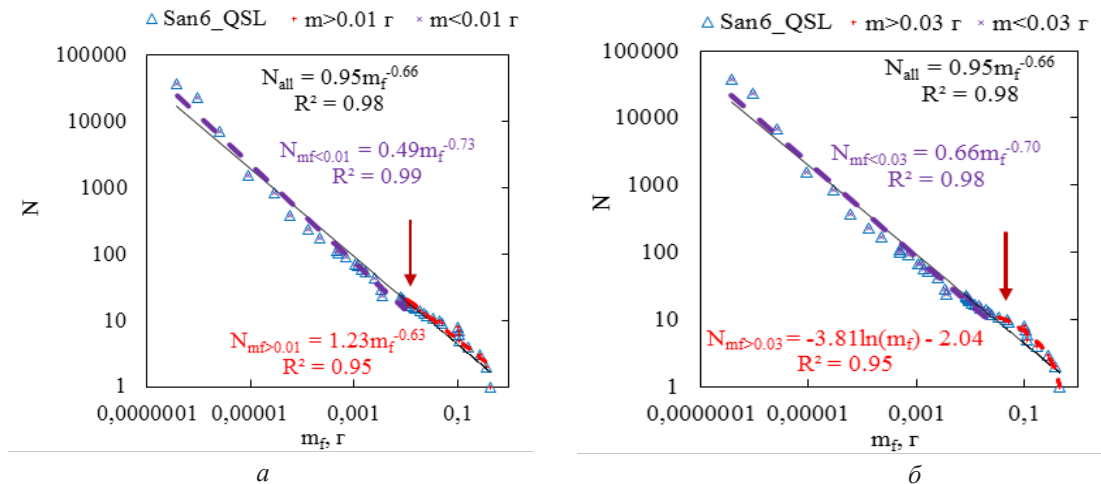


Рис. 8. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для образцов из песчаника (San6), полученные в условиях квазистатического нагружения QSL

На рис. 10, приведены кумулятивные распределения фрагментов по массе для андезита, полученные в условиях квазистатического сжатия. Анализировали фрагменты с массой большей-меньшей 0.01 г (рис. 10, а) и большей-меньшей 0.03 г (рис. 10, б). Последние, с $m_f > 0.03$ г, были по размеру соизмеримы с высотой цилиндрического образца (см. рис. 9, сито с размером ячейки 2.5 мм). На

примере образца №Mou1, показано, что в обоих случаях распределения мелких и крупных фрагментов по массе описываются степенными функциями. Кроме того, кумулятивное распределение по массе для всех фрагментов образцов из андезита $N(m_f)$, можно описать одной степенной функцией с большой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.99$. (см. ниже, рис. 10).



Рис. 9. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца песчаника №San6 (а) и андезита №Mou1 (б) после квазистатического нагружения

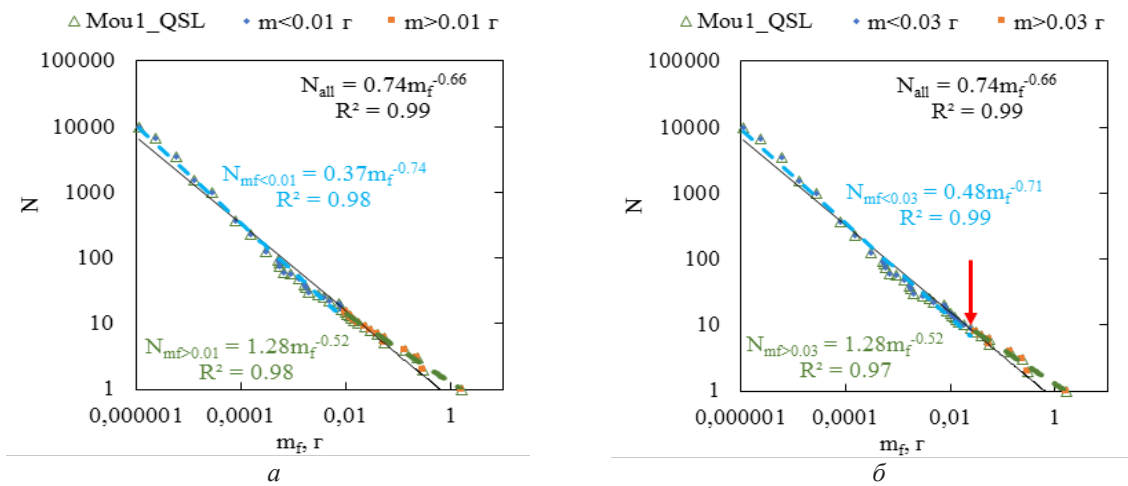
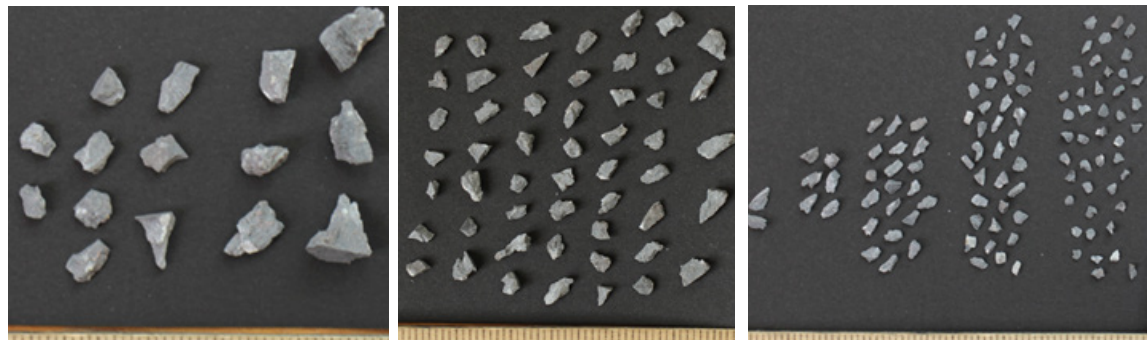


Рис. 10. Кумулятивное распределение фрагментов по массе для образцов из андезита (Mou1). Квазистатическое нагружение

Фрагменты цилиндрических на фотографиях, см. рис. 11. Масса всех образцов из андезита после фрагментов от массы образца составляла динамического нагружения приведены до 99%.



Размер сита
2.5 мм 1.6 1.0

Рис. 11. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца №МоU4 после динамического нагружения, скорость ударника (Steel) $c_{yo} \sim 20.8$ м/с. На каждом рисунке шкала, где между рисками 1 мм

Кумулятивные распределения фрагментов по массе представлены на рис. 12. Наблюдаем область незначительного перегиба в распределении $N(m_f)$, что говорит о наличии одного механизма формирования фрагментов в условии динамического нагружения. Приведен разбор распределения $N(m_f)$ на примере образца №МоU4, когда масса крупных фрагментов была больше 0.01 г (верхняя точка области перегиба, рис. 12, а) и больше 0.03 г (соизмеримы с размером образца, рис. 12, б). В первом случае, когда распределения больших фрагментов (>0.01 г) описываются степенной функцией с показателем степени (-1.17) и с $R^2 \sim 0.99$, и распределения фрагментов с массой $m_f < 0.01$ г – степенной функцией с показателем степени (-0.72) и с $R^2 \sim 0.95$. Во втором случае, когда крупные фрагменты (>0.03 г) – степенной функцией с показателем степени (-1.15) с $R^2 \sim 0.93$ (аппроксимация экспоненциальными или логарифмическими функциями с низким R^2), мелкие фрагменты с $m_f < 0.03$ г описываются степенной функцией с показателем степени (-0.75). Также все распределение можно аппроксимировать одной подходящей степенной функцией, но с небольшим $R^2 \sim 0.93$. После квазистатического индентирования образцов из песчаника

(ООО «Нефтеком», Чайядинского НГКМ скважины №1062 ствол 2) был проведен анализ образовавшихся фрагментов (рис. 13), являющихся небольшим остатком от массы всего образца, основная часть которого осталась зацементированной в металлическом каркасе (см. рис. 2).

Статистический анализ фрагментов проведен на примере двух образцов из песчаника 33450-20 (№San5020) и №33448-21 (№San4821). Кумулятивные распределения содержат фрагменты без основной массы образца (рис. 14). На кумулятивных распределениях $N(m_f)$ наблюдается сильный перегиб в виде вытянутой горизонтальной полочки с загибом вверх и вниз (рис. 14). В нашем случае (см. рис. 14), все распределение также плохо описывается одной степенной функцией (достоверность аппроксимации составляла $R^2 \sim 0.86 \dots 0.89$). Линейный участок (в основном, маленькие фрагменты) на распределениях описывается степенной функцией с показателем степени (-1.64...-1.76) с R^2 не выше 0.98. Крупные фрагменты ($m_f > 0.01$ г) описываются экспоненциальным ($\sim \exp(-5.37m_f)$) либо логарифмическим законами с $R^2 \sim 0.94$. На рис. 15. представлены кумулятивные распределения для квазистатических и динамических испытаний

песчаника и андезита. Одинаковые типы нагружения для различных материалов демонстрируют подобный вид кумуля-

тивных распределений фрагментов по массе, и положение точки перегиба зависит только от энергии нагружения.

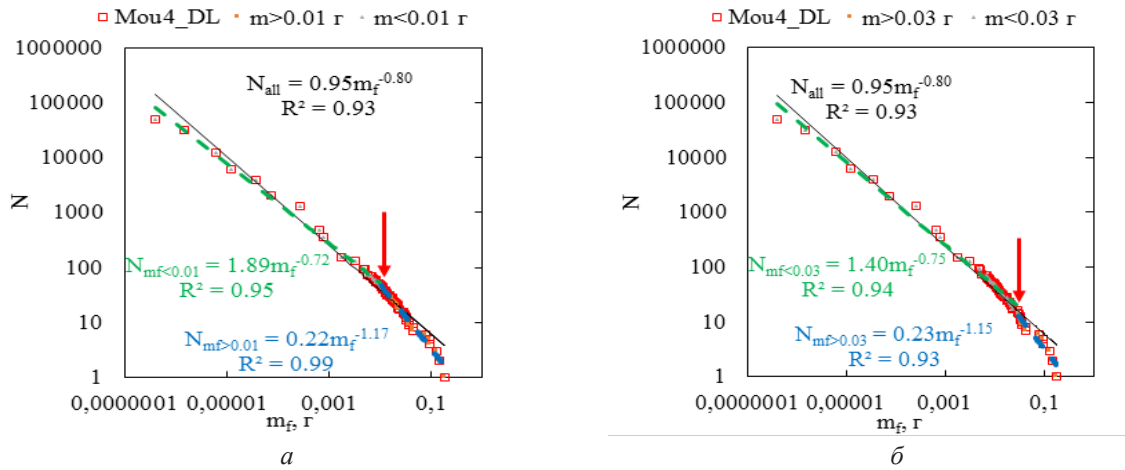


Рис. 12. Кумулятивное распределение фрагментов по массе для образцов из андезита (Mou4). Динамическое нагружение

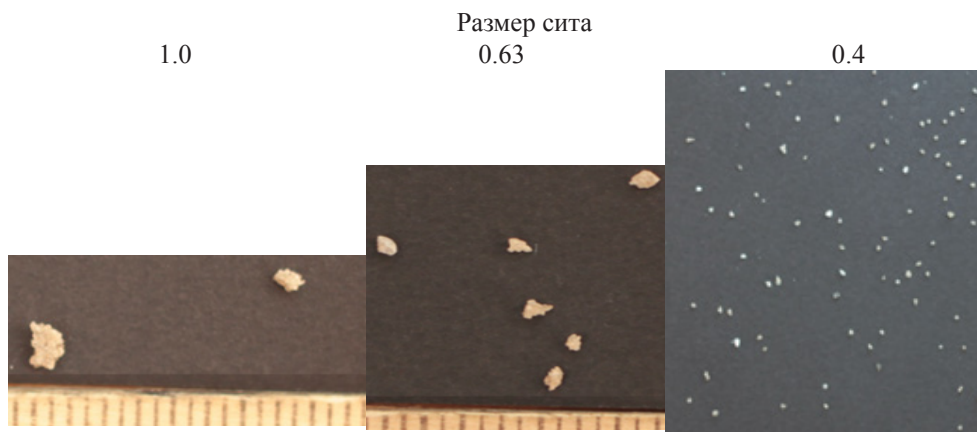


Рис. 13. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца из песчаника №San4821 после индентирования. На каждом рисунке шкала между рисками 1 мм

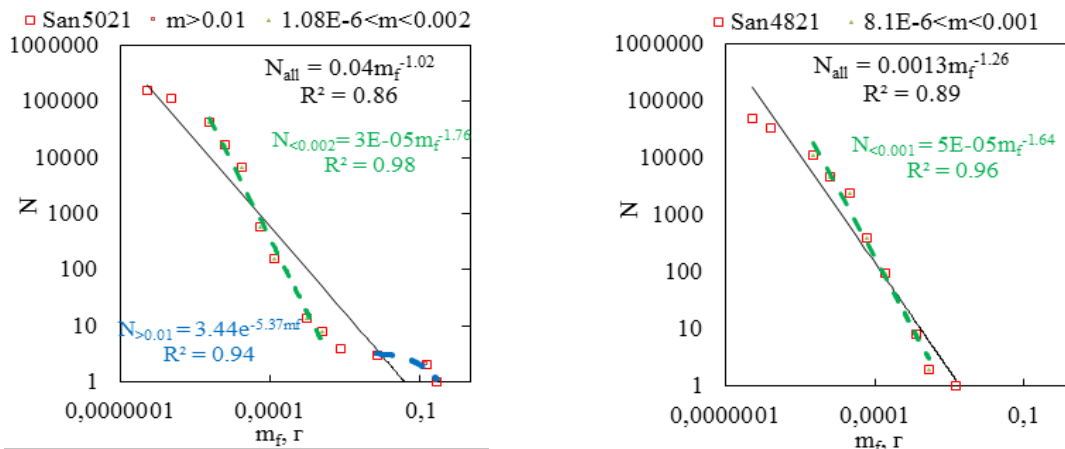


Рис. 14. Кумулятивное распределение фрагментов образца №San5021 и №San4821. Отсутствует самый крупный фрагмент

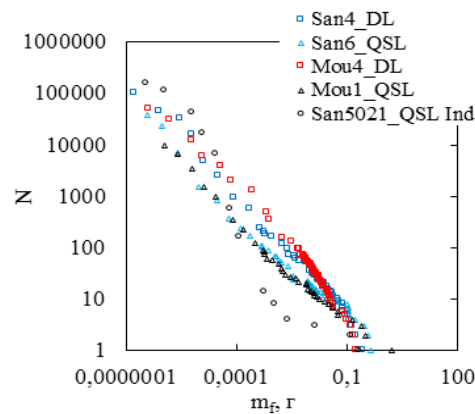


Рис. 15. Кумулятивные распределения горной породы (песчаника и каменистой горной породы), полученные в условиях квазистатического (Δ) и динамического нагружения (\square) и квазистатического индентирования (\circ). Обобщение результатов

Ниже приведены результаты анализа статистики фрагментации еще одной горной породы – кварцита (месторождение Уганда, Африка) в условиях квазистати-

ческого и динамического нагружения. На рис. 16 приведены изображения формы фрагментов образцов из кварцита, полученных в квазистатических условиях.



Рис. 16. Вид фрагментов, полученных в результате QSL кварцита (№2)

Кумулятивные распределения по массе фрагментов кварцитовых образцов, полученные в условиях квазистатического нагружения, имели два наклона (рис. 17). Их можно описать двумя степенными законами (рис. 17, а) либо одной степенной функцией (рис. 17, б) с достоверностью

аппроксимации $\sim 0.95 \dots 0.99$. Кумулятивные распределения фрагментов с массой, большей 0.01 г, в степенном показателе степени отличался (-1.33...-1.42). Изменение в значениях показателя степени (s - 0.69 до - 0.88...-0.91) аппроксимирующего закона кумулятивных распре-

лений фрагментов с массой меньше 0.01 г связано с изменением сценария нагружения в ходе эксперимента [24], когда имело место увеличение скорости верхней траверсы. Разрушение образцов при

квазистатическом нагружении происходило в основном в две стадии: накопление напряжений (появление множества магистральных трещин) и последующее полное разрушение [22].

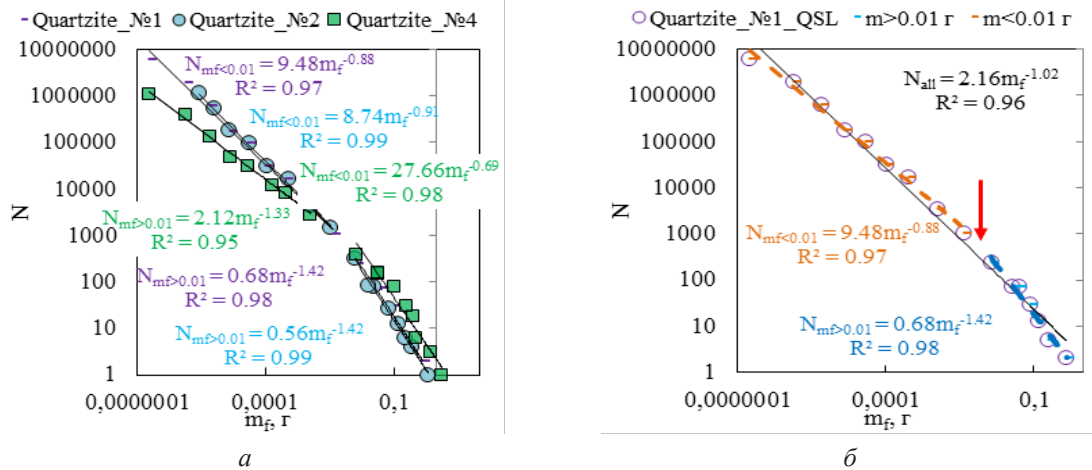


Рис. 17. Кумулятивное распределения фрагментов по массе в условиях квазистатического нагружения цилиндрических образцов из кварцита

В случае динамического нагружения кварцитового образца происходило полное фрагментирование, причем разрушение сопровождалось отрывом образовав-

шихся фрагментов. На рис. 18 приведена фотография с характерным видом фрагментов кварцита после динамического сжатия.

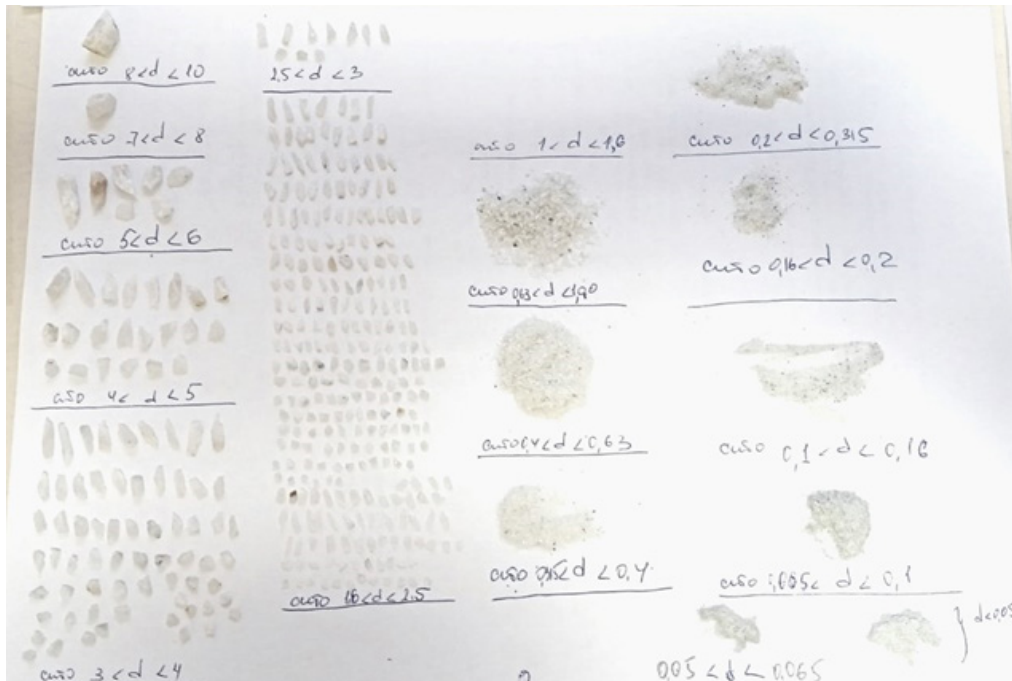


Рис. 18. Вид фрагментов образца из кварцита (№3) после DL

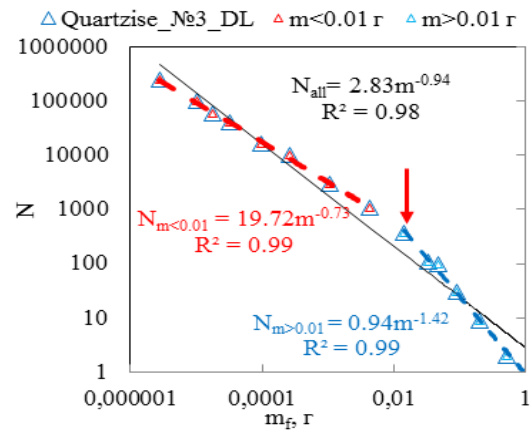


Рис. 19. Кумулятивное распределение фрагментов по массе в условиях динамического нагружения кварцита (№3). Разбор распределений по массе большей-меньшей 0.01 г

На кумулятивном распределении фрагментов кварцитового образца по массе (рис. 19) наблюдается перегиб.

$N(m_f)$ хорошо описывалось как одной степенной функцией с $R^2 \sim 0.98$ с показателем степени равной (-0.94), так и двумя степенными законами с показателем степени (-1.42) для фрагментов массой $m_f > 0.01$ и с показателем степени (-0.73) для $m_f < 0.01$ г.

Обсуждение результатов

Обобщая результаты полученных данных по песчанику, андезиту и кварциту, можно сделать следующие выводы. С увеличением энергии нагружения перегиб в кумулятивных распределениях $N(m_f)$ смещается в сторону меньших масштабов. Наблюдается видоизменение перегиба к незначительному наклону при переходе от анализа данных, полученных при низких (QSL), к анализу данных, полученных при более высоких скоростях нагружения (DL). При рассмотрении кумулятивных распределений фрагментов по массе больших-меньших 0.01 г (0.03 г) с высокой достоверностью аппроксимации (0.96...0.99) можно описать двумя степенными функциями (степенной и экспоненциальной/логарифмической) в условиях QSL и DL. Показано, что с увеличением энергии нагружения (QSL) в

степенных функциях, описывающих распределения $N(m_f)$ больших фрагментов ($m_f > 0.01$ г) образцов из кварцита, наблюдается изменение показателя степени в интервале (-1.33...-1.42), а в степенных функциях, которые описывают распределения мелких фрагментов ($m_f < 0.01$ г), показатель степени \sim (-0.69...-0.91). Для песчаника после QSL $N(m_f)$ для фрагментов с массой $m_f > 0.01$ г показатель степени (-0.63) и с массой (< 0.01 г) показатель степени – (-0.73). Для песчаника после DL для фрагментов с $m_f < 0.01$ г значение показателя степени увеличивается с ростом скорости деформации $0.8 \times 10^3 \dots 1.4 \times 10^3$ 1/с – с (-0.93) до (-0.74), а распределения больших фрагментов по массе (> 0.01 г) одинаково хорошо описываются экспоненциальной, логарифмической или степенной функциями и при рассмотрении $N(m_f)$ по массе большей 0.03 г аппроксимируются экспоненциальной или логарифмической функциями. Для кварцита после DL кумулятивные распределения $N(m_f)$ небольших и крупных фрагментов по массе хорошо описываются степенными функциями с разными показателями. То есть, анализ статистики фрагментации кварцита показал схожее описание кумулятивных распределений при любых условиях нагружения. Анализ статистики фрагментации

андезита как после QSL, так и после DL показал, что крупные и мелкие фрагменты также хорошо описываются степенными функциями. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для образцов из песчаника после квазистатического индентирования (в условиях всестороннего сжатия) описываются степенными законами (с показателем степени $\sim (-1.76... - 1.64)$) для малых фрагментов, и экспоненциальными законами ($\sim \exp(-5.37m_r)$) описывается куммулятивное распределение больших фрагментов. На

таких кумулятивных распределениях наблюдается вытянутая область перегиба при переходе от одной статистики к другой, возможно, связанная с переходом материала к состоянию самоорганизованной критичности. Похожий вид распределений (рис. 14) наблюдался на кумулятивных распределениях, полученных на цилиндрических образцах из керамик (композитов) на основе оксида алюминия плазменного напыления [33] и на основе силицированного графита [34] в условиях динамического индентирования,

Таблица 2.

Соотношение аппроксимаций кумулятивных распределений $N(m_r)$ и массы фрагментов в условиях динамического, квазистатического нагружений и квазистатического индентирования

Условие/ Образец	$m_r > 0.01$	$m_r < 0.01$	$m_r > 0.03$	$m_r < 0.03$	Все фрагменты
QSL, песчаник	Степенной закон, степень (- 0.63)	Степенной закон, степень (- 0.73)	Логарифмический закон (3.81Ln(m)-2.04)	Степенной закон, степень (- 0.70)	Степенной закон, степень (- 0.66)
QSL, андезит	Степенной закон, степень (- 0.52)	Степенной закон, степень (- 0.74)	Степенной закон, степень (- 0.55)	Степенной закон, степень (- 0.71)	Степенной закон, степень (- 0.66)
QSL, кварцит	Степенной закон, степень (- 1.42...-1.33)	Степенной закон, степень (- 0.91...-0.69)			Степенной закон, степень (- 1.02)
DL, песчаник	Степенной закон с показателем степени (- 0.97), или «exp» закон, или «log»	Степенной закон, степень (-0.74...-0.93)	Экспоненциальный закон $\exp(-11.95m)$	Степенной закон, степень (- 0.75)	Степенной закон, степень (-0.87...- 0.72) при σ (46...604 МПа)
DL, андезит	Степенной закон, степень (- 1.17)	Степенной закон, степень (- 0.72)	Степенной закон, степень (- 1.15)	Степенной закон, степень (- 0.75)	Степенной закон, степень (- 0.80)
DL, кварцит	Степенной закон, степень (- 1.42)	Степенной закон, степень (- 0.73)			Степенной закон, степень (- 0.94)
QSL_Ind, песчаник	Экспоненциальный закон $\exp(-5.37m)$	Степенной закон, (- 1.76...-1.64)			Степенной закон, степень (- 1.02)

реализованного на «РСГ-25». Все данные проанализированных кумулятивных распределений по массе отражены в таблице 2.

По результатам анализа данных фрагментации природных материалов можно сделать вывод, что на формирование количества фрагментов N_m данной массы m_f оказывают влияние следующие определяющие условия. Во-первых, в каждой серии экспериментов условия нагружения (напряжение – σ , Па.). Вторым аспектом выступают свойства материала (пористость, плотность ρ , кг/м³). Третьим являются геометрические параметры образца, в нашем случае – это площадь поверхности, которая подвергалась нагружению (площадь основания цилиндрических и кубических образцов, площадь внутренней поверхности трубок – S , м²). Предполагая, что закон формирования фрагментов может являться автомодельным, распределения фрагментов массой можно записать в нормированных или безразмерных координатах

в виде одной функции, как это сделали в своих работах авторы [4, 15].

При нормировании количества фрагментов N_m массой m_f использовали общее количество фрагментов образца после разрушения. Так как минимальная погрешность определения массы достигалась на ситах с размером сетки 0.063Н, то за общее количество фрагментов брали сумму фрагментов до этого сита, обозначив их за $N_{>0.063}$. С учетом вышеизложенного, кумулятивные распределения по массе $N(m_f)$ можно представить в нормированных координатах $N^*(m^*)$:

$$N^* = \left(\frac{N_m}{N_{>0.063}} \right) \left(\frac{p_0}{\sigma_{max}} \right),$$

$$m^* = \frac{m_f S^{1.5}}{\rho},$$

где σ_{max} – максимальное напряжение до разрушения, p_0 – атмосферное давление при нормальных условиях, 100300 Па. Ниже приведена диаграмма в безразмерных координатах $N^*(m^*)$ (рис. 20) для образцов песчаника и кварцита в разных условиях нагружения. Данные легли под

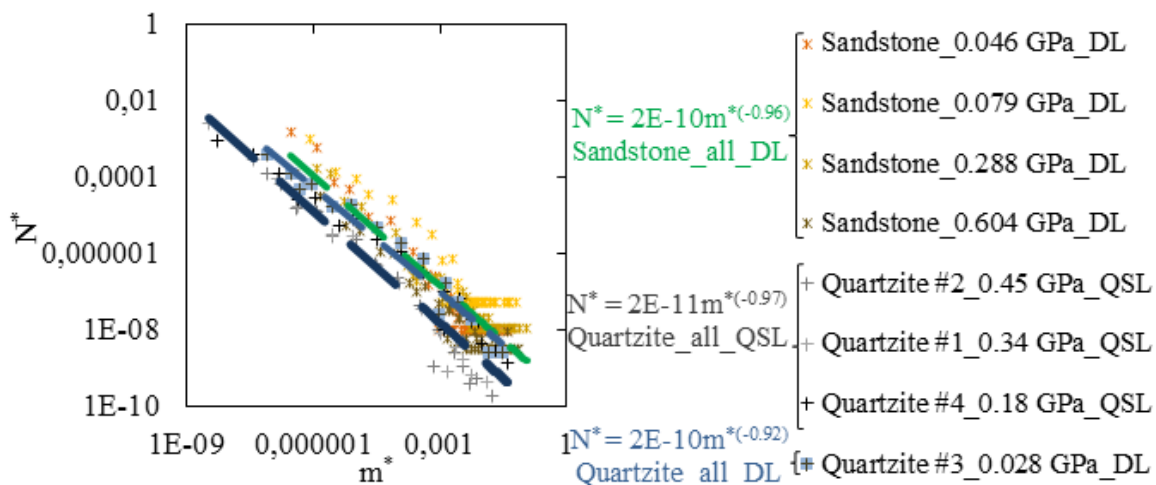


Рис. 20. Распределение количества фрагментов по массе в нормированных (безразмерных) координатах. Log-Log оси

определенным углом к оси абсцисс, сместив все значения в одну область.

На рис. 21 приведены результаты работы в сопоставлении с другими материалами (полые цилиндры из оксида

алюминия, цилиндры из кварца), полученными ранее при разных условиях нагружения в Лаборатории физических основ прочности, ИМСС УрО РАН, Пермь.

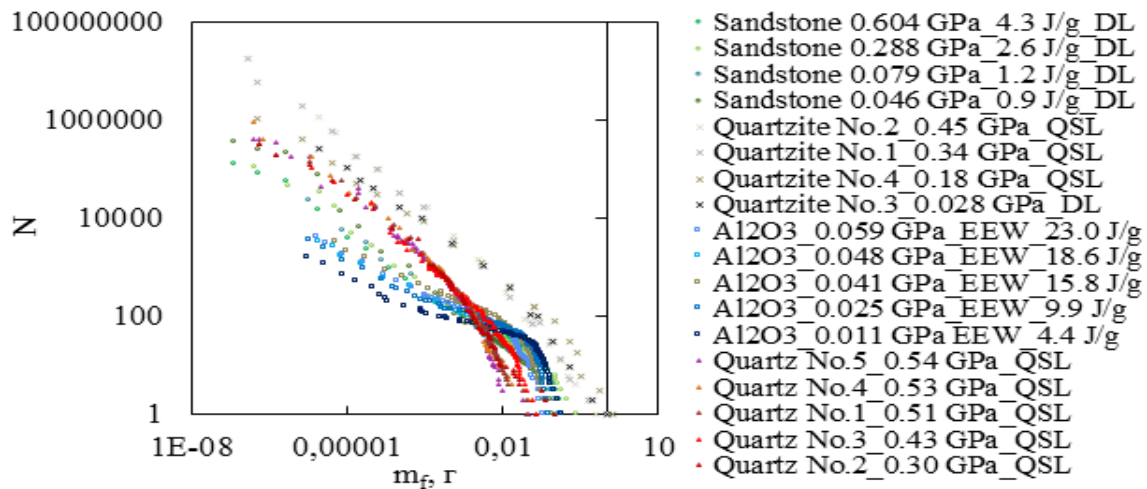


Рис. 21. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для керамики [11] и природных материалов [24, 31], полученные при различных условиях нагружения. Log-Log оси

На рис. 22 данные кумулятивных функций представлены в нормированных координатах $N^*(m^*)$. Как видим, все данные сместились в одну область, что гово-

рит о наличии предполагаемой «автомодельности» в формировании фрагментов любой формы, типа материалов и условий нагружения.

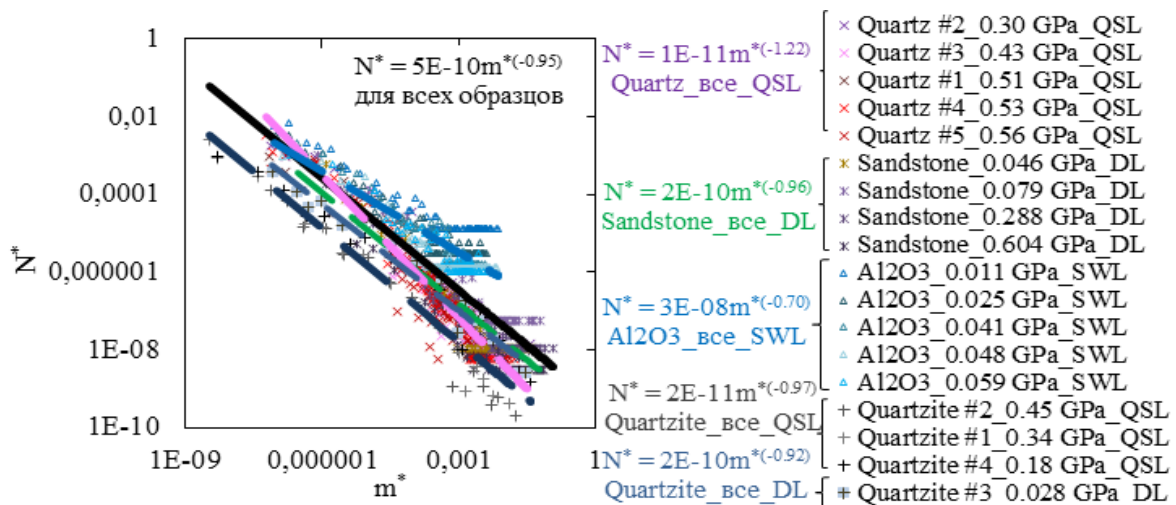


Рис. 22. Распределение количества фрагментов по массе в нормированных (безразмерных координатах). Логарифмические оси

Выводы

Проведены испытания образцов из природных материалов (кварцит, песчаник и андезит) под действием динамического (DL) и квазистатического (QSL) сжатия и квазистатического индентирования (QSInd) (песчаник при всестороннем сжатии) в условиях сохранения фрагментов. Проведен анализ статистики фрагментации образцов с использовани-

ем метода «взвешивания» и «фотографии», что позволило построить кумулятивные распределения фрагментов по массе с высокой достоверностью аппроксимации и с минимальной погрешностью измерения.

Для всех образцов полученные кумулятивные распределения фрагментов по массе в условиях QSL и DL имеют два наклона. С большой достоверно-

стью аппроксимации ($R^2 \sim 0.97 \dots 0.99$) их можно описать одной степенной функцией. В условиях QSL наблюдается более выраженный перегиб в распределениях $N(m_f)$, чем перегиб, полученный в условиях DL, как для андезита, так и для песчаника, и для кварцита. Распределения $N(m_f)$, полученные в условиях DL лежат выше тех, что получены при QSL. Точка перегиба смещается в сторону меньших масштабов с увеличением энергии нагружения. В случае квазистатического индентирования песчаника кумулятивные распределения имеют вытянутые «ступеньки», связанные с затяжным переходом от одиночных трещин к неполной фрагментации (основная часть образца осталась внутри обоймы). Перегиб в полученных кумулятивных распределениях связывается с влиянием механизма разрушения при иницировании одного очага разрушения (по типу «горного удара»). Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в основном в две стадии: накопление повреждений, появление множества магистральных трещин и последующее полное разрушение [22]. В случае динамического нагружения, при достаточном значении энер-

гии деформации, происходило полное разрушение образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов. Статистические распределения фрагментов в диапазоне меньших масштабов (масс фрагментов), близкие к степенным распределениям, отражают «самоподдерживающийся» тип разрушения при достижении предельной плотности энергии в объеме образца и отражают автомодельный характер развития разрушения в широком диапазоне масштабов.

Экспериментальное исследование фрагментации позволило выявить качественные изменения статистики фрагментации для ряда горных пород в зависимости от интенсивности нагрузки ($10^{-3} \div 10^3$ 1/с). Наблюдается сходство статистики фрагментации по степенному закону и асимптотических режимов разрушения с множественными разрывами, по сценарию хрупкого разрушения.

Авторы благодарят С.В. Уварова,
В.В. Чудинова и М.В. Банникова за помощь
в проведении эксперимента
и О.Б. Наймарка, М.В. Банникова
за обсуждение результатов.

Библиографический список

1. *Meibom A., Balslev I.* Composite power laws in shock fragmentation // *Physical Review Letters*. – 1996. – V. 76. – No.14. – P. 2492–2494. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2492>
2. *Chen W., Ravichandran G.* Dynamic compressive failure of glass ceramic under lateral confinement // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1997. – V. 45. – No.8. – P. 1303–1328. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00006-9)
3. *Katsuragi H., Sugino D. and Honjo H.* Scaling of impact fragmentation near the critical point // *Physical Review E*. – 2003. – V. 68. – No.4. – P. 046105(1–6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.046105>
4. *Katsuragi H., Ihara S., Honjo H.* Explosive fragmentation of a thin ceramic tube using pulsed power // *Physical Review Letters*. – 2005. – V. 95. – No.9. – P. 095503(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.095503>
5. *Grady D.* *Fragmentation of rings and shells* – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Printed in Germany. – 374 pp.
6. *Davydova M.M., Uvarov S.V., Naimark O.B.* Space-time scale invariance in dynamically fragmented quasi-brittle materials // *Physical Mesomechanics*. – 2016. – V.19. – No.1. – P. 86-92. <https://doi.org/10.1134/S1029959916010094>
7. *Mott N.F.* A theory of the fragmentation of shells and Bombs // *Ministry of Supply. Past 3*. – 1943. – No. A.C.4035. – P. 1–51. https://doi.org/10.1007/978-3-540-27145-1_11

8. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Экспериментальное изучение дробления металлических колец // Проблемы Прочности. – 1984. – №8. – С. 108–110.
9. Wittel F.K., Kun F., Herrmann H.J., Kröplin B.H. Fragmentation of shells // Physical Review Letters. – 2004. – V. 93. – No.3. – P. 035504(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.035504>
10. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Naimark O.B. Experimental research of self-regularities of ceramics fracture under shock wave loading. PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – No. 3. – P. 25-37. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.3.03>
11. Банникова И.А. Автомодельные закономерности деформирования и разрушения сплошных сред при интенсивных воздействиях / Дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.02.04. – Томск, ТГУ, 2017. – 168 с.
12. Ching Emily S.C., Lui S.L., Ke-Qing Xia. Energy dependence of impact fragmentation of long. Glass rods // Physical A. – 2000. – V. 287 – P. 83–90. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(00\)00446-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(00)00446-5)
13. Gladden J.R., Handzy N.Z., Belmonte A., Villermaux E. Dynamic buckling and fragmentation in brittle rods // Physical Review Letters. – 2005. – V. 94. – P. 035503(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.035503>
14. Bannikova I.A., Uvarov S.V. Experimental study of fragmentation of fused quartz cylinders under quasi-static loading with the fractoluminescence recording // Proc. Struct. Int.. – 2021. – V. 32. – P. 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.003>
15. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Crossover of weighted mean fragment mass scaling in two-dimensional brittle fragmentation // Physical Review E. – 2004. – V. 70. – No.62. – P. 065103(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.065103>
16. Grady D.E. Impact breach and fragmentation of glass plate // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – V. 38. – Is.6. – P. 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.015>
17. Greiner W., Stöcker H. Hot nuclear matter // Scientific American. – 1985. – V. 252. – No.1. – P. 76–87.
18. Grady D.E. Length scales and size distributions in dynamic fragmentation // International Journal of Fracture. – 2010. – V. 163. – P. 85–99. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9418-4>
19. Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure / Ed. G. Capriz and P. Mariano, Birkhäuser, Boston. – 2004. – P. 75–114.
20. Kurdyumov S.P. Evolution and self-organization laws of complex systems // International Journal of Modern Physics. – 1990. – V. 1(4). – P. 299–327. <https://doi.org/10.1142/S0129183190000177>
21. Lyapunova E.A., Davydova M.M., Zaitzev D.V., Panfilov P.E. Statistical regularities of alumina fragmentation under uniaxial compression at room and liquid nitrogen temperatures // AIP Conference Proceedings – 2016. – No.1785. – P. 040033. <https://doi.org/10.1063/1.4967090>
22. Naimark O.B., Uvarov S.V., Davydova M.M., Bannikova I.A. Multiscale statistical laws of dynamic fragmentation // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, No.1. – P. 90-101. <https://doi.org/10.1134/S1029959917010088>
23. Astrom J.A., Linna R.P., Timonen J. Exponential and power-law mass distributions in brittle fragmentation // Physical Review E. – 2004. – Vol. 70. – P. 026104(1–7). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.026104>
24. Bannikova I.A., Uvarov S.V. Scaling laws in fragmentation dynamics of rock materials // Proc. Struct. Int. – 2021. – V. 33. – P. 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.043>
25. Наймарк О.Б., Аглетдинов Э.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Бурмистров Е.В., Лукин С.В., Никитюк А.С., Овчаренко Ю.В., Уваров С.В., Чудинов В.В. Механизмы разрушения горных пород в условиях множественных метастабильных состояний, индуцированных дефектами // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123. – №12. – С. 1362-1370. <https://doi.org/10.31857/S0015323022600988>
26. Zaiser M. Scale invariance in plastic flow of crystalline solids // Advances in Physics. – 2006. – V. 55. – P. 185–245. <https://doi.org/10.1080/00018730600583514>
27. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // J. Phys. Condens. Matter. – 1997. – V. 9. – No.21. – P. 4319– 4344. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/21/002>
 Oborin V.A., Bayandin Y.V., Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Naimark O.B. Self-Similar Patterns of Damage Development and Reliability Assessment of AMg6 and D16T Aluminum Alloys under Consecutive Dynamic and Gigacycle Loading // Physical Mesomechanics. – 2019. – V. 22. – No. 2. – P. 141-151. <https://doi.org/10.1134/S1029959919020048>

28. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соколов М.А., Биалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №2. – С. 116–126. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.07>
29. Банникова И.А. «Метод фотографии» как инструмент исследования фрагментации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №5. – С. 42–44.
30. Bannikova, I., Uvarov, S. Experimental study of fragmentation of fused quartz cylinders under quasi-static loading with the fractoluminescence recording // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32. – P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.003>
31. Банникова И.А., Савельева Н.В., Банников М.В., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Статистические закономерности разрушения и фрагментации горных пород при квазистатическом и динамическом воздействии // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2023: материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием. – Томск: ТГУ, 2023. – С. 19–22.
32. Bannikova I.A., Saveleva N.V., Uvarov S.V., Bannikov M.V., Panfilov P.E., Naimark O.B. Investigation of plasma spray ceramic fragmentation statistics in a wide range of strain rates // Russian Physics Journal. – 2023. – V.66. – No.9. – P. 990–997. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03034-8>
33. Uvarov S.V., Bannikova I.A., Naimark O.B., Gareev A.R. Dynamic indentation and low velocity impact of siliconized graphite // XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024) (<http://www.ihed.ras.ru/elbrus24/program/restore.php?id=200>).

INVESTIGATION OF FRAGMENTATION STATISTICS OF NATURAL MATERIALS IN LABORATORY CONDITIONS

Bannikova I.A., Saveleva N.V.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Bannikova I.A., Saveleva N.V. Investigation of fragmentation statistics of natural materials in laboratory conditions // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – No 4. – P. 18–38. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.2>

The results of study of the behavior of natural materials (quartzite, sandstone, andesite) under quasi-static, dynamic loading and low-speed indentation (10^{-3} – 10^3 1/s) are presented. The experimental conditions made it possible to preserve fragmented samples and to analyze the statistics of the preserved fragments by size (mass). During the research, a system of laboratory sieve and an HR-202i electronic scales with a measurement error of 0.0001 g were used. The method of processing fragment photographs allowed us to establish the number and mass of fragments on sieves with cell sizes up to 0.063–0.05 mm, not less than 99% of the sample weight and minimize measurement error. The obtained cumulative distributions of fragments by mass $N(m_i)$ show a change in the shape of the inflection and a shift of the inflection point toward smaller scales with increasing strain rate. The data analysis reflects the similarity of the statistics of fragmentation according to the power law and asymptotic fracture modes with multiple ruptures obtained according to the brittle fracture scenario. It is shown that specimens fracture occurs according to different scenarios depending on loading conditions and is associated with a change in the rate of transition from one stage of crack appearance (or accumulation of stress states, defective structure) to another (crack formation and complete fragmentation). It has been found that the formation of fragments is of an “automodel” nature.

Keywords: fragmentation statistical analysis, quartzite, sandstone, andesite.

Сведения об авторах

Банникова Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614018 г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: malgacheva@icmm.ru

Савельева Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: saveleva@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 30.10.2024 г.

ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ СИНАПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ДИНАМИКУ СБАЛАНСИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.В. Агеева, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Д.С. Голдобин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Агеева М.В., Голдобин Д.С. Влияние дискретности синаптических сигналов на динамику сбалансированных нейронных сетей // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 39–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.3>

В 2024 году Нобелевская премия по физике присуждена за работы, которые заложили фундамент развития машинного обучения на базе искусственных нейронных сетей. Это событие можно считать публичным признанием роли математических моделей, подобных модели Хопфилда, и привлечения математического аппарата статистической физики и квантовой механики для описания коллективной динамики в них. Несмотря на то, что медиатором динамики сети нейронов являются дискретные синаптические сигналы, теоретическое описание эндогенного шума в таких сетях строится в рамках диффузионного приближения. Такой подход имеет существенный недостаток, поскольку фактически дискретный набор сигналов представляется в виде непрерывного гауссова шума. Оказывается, что результатом такого подхода является фактическая «слепота» полученных уравнений к некоторым режимам коллективной динамики системы: в частности, к возможности гистерезисных переходов между асинхронной и колебательной динамикой в сбалансированной нейронной сети с разреженной системой связей. В статье описывается недавно введенный формализм полного среднего поля, учитывающий эффективный синаптический дробовой шум в разреженной сети спайковых нейронов. Также обнаружены и раскрыты два механизма возникновения глобальных колебаний в системе в зависимости от степени разреженности сети. Разработанный формализм был протестирован на двух моделях динамики нейрона: квадратичные нейроны – пороговые интеграторы (quadratic integrate-and-fire neurons) и модели Морриса–Лекара.

Ключевые слова: полное среднеполевое описание, квадратичные нейроны – пороговые интеграторы, диффузионное приближение, дробовой шум.

8 октября 2024 года пресс-служба Нобелевского комитета объявила лауреатов премии по физике. Премия «за фундаментальные открытия и изобретения, которые сделали возможным машинное обучение на базе искусственных нейронных сетей» [1] присуждена за работы, связанные с моделью Хопфилда (Hopfield, [2]) – один из концептуальных вариантов, как может быть реализована работа ассоциативной памяти. Упрощения данной модели, с одной стороны, избавляют ее от второстепенных особенностей, которые зависят от частных вариантов воплощения концепции, а с другой – позволяют выработать понимание универсальных закономерностей и принципов работы таких систем. Причем последнее может быть сделано с математической строгостью на основе подходов и математического аппарата статистической физики больших ансамблей и квантовых систем. Давно осознанное узкими специалистами в статистической физике и прикладной математике понимание роли моделей, подобных модели Хопфилда, не только доказало свою практическую состоятельность – свидетельством этому является семейство методов, которые сегодня принято объединять под общим названием «Искусственный интеллект». Решение Нобелевского комитета в 2024 году является публичным признанием этой роли.

В области физической кинетики (неравновесной статистической физики) больших сетей нейронов с различными классами возбудимости остается достаточно много вопросов, ответ на которые может быть дан в рамках континуального описания для плотности вероятности. Ряд строгих математических результатов здесь играет очень важную роль. Так, например, соблюдение условий теории Отта–Антонсена [3] запрещает динамику кластеризации [4], что сразу исключает возможность привлечения сетей опреде-

ленного типа для решения целого класса задач обработки информации. Публикуемые в литературе примеры реализации таких задач при детальной проверке обнаруживают грубые ошибки, исправление которых [5] приводит к пропаданию динамики кластеризации и исчезновению описываемых эффектов. Другой актуальной проблемой является кинетическое описание влияния эндогенного шума на макроскопическую динамику сетей нейронов.

Адекватное предсказание динамики многих природных и технологических систем требует учитывать дискретный характер изучаемых стохастических явлений. Типичным примером подобной ситуации может служить дробовой шум в электрических сетях, который представляет собой последовательность коротких импульсов, и потому не может описываться непрерывным образом. Природа этого шума – случайные флуктуации в движении зарядов в проводнике: ток представляет собой поток заряженных частиц, движущихся в соответствии с прикладываемым потенциалом. При столкновении с некоторым барьером, потенциальная энергия накапливается до тех пор, пока не превысит некоторое критическое значение, необходимое для его преодоления. Когда энергии окажется достаточно, она резко преобразуется в кинетическую энергию, и барьер преодолевается. Поскольку каждый электрон пересекает этот потенциальный барьер случайным образом, в случайный момент времени возникает всплеск энергии [6], а в совокупности этих преодолений мы получаем дробовой шум. Его возникновение возможно, в целом, в любом проводнике, поскольку потенциальным барьером может служить любой дефект или примесь в металле. Однако для детектирования такого шума значимыми оказываются характерные размеры пре-

пятствия, и поэтому учет этого эффекта представляет значительно больший интерес, когда речь идет о полупроводниках. Также важно отметить, что этот шум не зависит от температуры, в отличие от белого шума, который, напротив, связан с тепловыми колебаниями в системе, и, как следствие, является непрерывным. Таким образом, включение дробового шума в математическую модель динамики системы крайне важно для корректного описания возникающих явлений во многих областях физики, от мезоскопических проводников [7] и до управляемых гранулированных газов [8].

Другим очевидным примером необходимости учета дискретности событий является нейронная динамика. Нейрон состоит из трёх основных частей – тела, дендрита (точка получения сигнала от предыдущего нейрона) и аксона (точка передачи сигнала последующему нейрону). В покое внутри нейрона находятся как положительно заряженные ионы калия, так и отрицательно заряженные аминокислоты и белки. Снаружи, в то же время, преобладают положительно заряженные ионы натрия и кальция, в результате чего возникает разность потенциалов по разные стороны клетки – так называемый потенциал покоя. Передача сигналов между нейронами обеспечивается синапсами – местами контакта двух нейронов. Под влиянием некоторой волны возбуждения (потенциала действия) в область синаптической щели выделяются нейромедиаторы, в результате действия которых внутрь отрицательно заряженной клетки попадают ионы натрия, что деполяризует клетку. Когда клетка преодолевает порог деполяризации, возникает потенциал действия. Рост потенциала действия провоцирует открытие потенциал-зависимых кальциевых каналов, и положительно заряженные ионы могут свободно перемещаться внутрь клетки,

вызывая кратковременное изменение мембранного потенциала [9]. Это изменение носит название постсинаптический потенциал (ПСП). Выделяют два основных типа ПСП – возбуждающий и тормозной, в зависимости от того, какого заряда ионы проходят через мембрану. Если открытие канала приводит к деполяризации клетки, то возникает возбуждающий ПСП, поскольку потенциал нейрона приближается к порогу активации. Тормозной ПСП, напротив, является результатом гиперполяризации клетки. Движение иона внутри клетки завершается в момент достижения равновесного потенциала – когда силы диффузии и электростатического отталкивания компенсируют друг друга. Обычно предполагается, что постсинаптические потенциалы, стимулирующие нейрон в коре головного мозга, не коррелируют друг с другом, имеют малые амплитуды и высокие скорости поступления. Поэтому нейронная динамика среднего поля рассматривалась в рамках диффузионного приближения [10], а синаптические импульсы – как непрерывный гауссов процесс.

Однако некоторые эксперименты показали, что редкие постсинаптические потенциалы большой амплитуды могут оказать значительное влияние на активность коры. Более того, сети тормозных нейронов с низкой связностью ($K \sim 30 - 80$) были обнаружены в зрительной коре кошки [11, 12] и гиппокампе крысы [13]. Эти эксперименты показывают, какое значение имеет разработка формализма среднего поля, способного учитывать дискретность синаптических сигналов для случайной нейронной сети [14, 15]. Ранее такие формализмы уже были разработаны для модели IF (Integrate-and-Fire), однако такие подходы строго ограничены стационарными решениями и непригодны для описания возникновения колебательного поведения.

В работе [16] строго выводится формализм полного среднего поля для сбалансированных нейронных сетей, с учетом разреженности нейронной сети и дискретности синаптических импульсов. Предполагается, что использование такого подхода делает возможным воспроизведение всех возможных динамических состояний системы. Первый важный шаг, проделанный в исследовании [16], – демонстрация несостоятельности диффузионного приближения в воспроизведении колебательной динамики нейронных сетей при достаточно низком возбуждающем входном токе стимуляции (сильная тормозная обратная связь) путем рассмотрения моделей, основанных на проводимости и токе.

Кроме того, для модели квадратичных нейронов – пороговых интеграторов (Quadratic Integrate-and-Fire, QIF) [17] в рамках полного среднеполевого подхода авторами была получена бифуркационная диаграмма, охватывающая асинхронный и колебательный режимы. В частности, этот подход выявляет суб- и суперкритические бифуркации Хопфа при переходе от асинхронного к колебательному режиму, а также область сосуществования этих двух фаз: все это отсутствует в рамках диффузионного приближения. Точные событийно-ориентированные симуляции крупных сетей подтверждают сценарий, предсказанный в рамках теории полного среднего поля. Кроме того, было показано, что глобальные колебания, индуцированные дискретными синаптическими сигналами, могут возникнуть посредством двух разных механизмов – через активацию кластеров при достаточно малых K и через дрейф при больших K .

Сбалансированная нейронная сеть

В качестве прообраза динамически сбалансированной системы рассматрива-

ется разреженная сеть ингибиторных (тормозных) синаптических связей, состоящая из N нейронов, динамика мембранных потенциалов которых описывается следующим образом:

$$\dot{V}_i(t) = F(V_i) + I - g \sum_{j=1}^N \sum_n \lambda_{ji} \delta(t - t_j^{(n)}) \quad (1)$$

где I представляет собой внешний постоянный ток, g – синаптическую связь, а последний член – ингибиторную синаптическую связь. Последнее слагаемое представляет собой линейную суперпозицию мгновенных тормозных постсинаптических потенциалов, испускаемых в моменты времени $t_j^{(n)}$ со стороны пресинаптических нейронов, связанных с i -ым нейроном; λ_{ji} – матрица смежности случайной сети, значения которой равны 1 (или 0), если соединение нейронов существует (или нет). Также предполагается, что коэффициент $K = \sum_j \lambda_{ji}$ одинаков для всех нейронов. Рассматриваются две основные парадигматические модели импульсного нейрона: модель QIF, предполагающая, что $F(V) = V^2$ [17], и вторая модель – модель Морриса–Лекара [18], основанная на ионной проводимости. Эти модели являются представителями первого и второго классов возбудимости соответственно.

Квадратичные нейроны – пороговые интеграторы (QIF)

Это биологическая модель нейрона, в которой динамика потенциала действия предполагается пропорциональной квадрату потенциала. Моделирование предполагает следующий алгоритм: каждый раз, когда мембранный потенциал V достигает бесконечности, испускается δ -импульс, который мгновенно доставляется к постсинаптическим нейронам, а потенциал мембраны при этом сбрасывается до $-\infty$.

В отсутствие синаптической связи (то есть, при нулевом последнем слагаемом в (1)) модель QIF воспроизводит возбудимую динамику при $I > 0$ и колебательную при $I < 0$. С учетом того, что авторами рассматривается только ингибиторная сеть, нетривиальная коллективная динамика оказывается возможной только в случае, когда нейроны являются надпороговыми, то есть в случае $I > 0$. В отличие от модели Морриса–Лекара, модель QIF полностью игнорирует динамику ионных каналов. Помимо квадратичной зависимости часто также рассматривается и экспоненциальная, причем некоторые экспериментальные данные показывают лучшее совпадение именно с последней [18].

Однако вблизи порога бифуркации между возбудимым режимом и режимом периодических колебаний модели практически перестают различаться: более того, QIF является нормальной формой для этой бифуркации, что и обуславливает выбор данной модели для многих теоретических исследований.

Модель Морриса–Лекара

В случае, когда динамика мембранного потенциала решающим образом зависит от активности ионных каналов, более уместным оказывается использовать модель Морриса–Лекара. Нелинейность в уравнении (1) эта модель предполагает рассчитывать в виде:

$$F(V) = g_L(E_L - V) + g_{Ca}M_\infty(V)(E_{Ca} - V) + g_KN_K(V)(E_K - V) + I_c$$

где g_L – проводимость соответствующих каналов, I_c – ток, E – равновесный потенциал соответствующих каналов,

N_K – вероятность того, что канал K^+ открыт. Динамика N_K задается уравнением:

$$\dot{N}_K(V) = \frac{N_\infty(V) - N_K(V)}{\tau_N(V)}$$

где

$$M_\infty(V) = \frac{1}{2}(1 + \text{th}((V - E_1) / E_2))$$

$$N_\infty(V) = \frac{1}{2}(1 + \text{th}((V - E_3) / E_4))$$

$$\tau_N(V) = 15 / \text{sh}((V - E_3) / 2E_4)$$

Последние три функциональные зависимости являются традиционной аппроксимацией экспериментальных данных, с параметрами аппроксимации E_1 – E_4 [18]. Параметры моделирования выбираются таким образом, чтобы динамика соответствовала возбудимой мембране II класса.

Несмотря на то, что фактически модель Морриса–Лекара представляет собой систему нелинейных уравнений, ее исследование оказывается более простым, чем для модели QIF. Эта модель вполне может быть решена простыми численными схемами, такими, как,

например, стандартный метод Эйлера с постоянным шагом по времени. Моделирование же QIF требует специальных дополнительных методов: в работе [16] используется точный событийно-ориентированный метод.

Подход среднего поля

В случае, когда сеть нейронов оказывается достаточно разреженной ($K \ll N$), последовательность испускаемых импульсов от пресинаптических нейронов можно считать некоррелированной, то есть полагать пуассоновским случайным процессом. В таком случае, динамику среднего поля для любого нейрона можно представить в виде уравнения Ланжевена [20]:

$$\dot{V}(t) = F(V) + I - gS(t)$$

где $S(t)$ – пуассоновская последовательность δ -пиков со скоростью $R(t) = Kv(t)$, где $v(t)$ – самосогласованная мгновенная частота испускания синаптических импульсов конкретным нейроном, осредненная по ансамблю. Обычно пуассоновскую последовательность импульсов аппроксимируют в рамках диффузионного приближения, так что

$$S(t) = R(t) + \sqrt{R(t)}\xi(t)$$

где $\xi(t)$ – нормированный гауссов белый шум. Однако, как показывают авторы работы [16] на примере модели Моррисиса–Лекара, диффузионное приближение оказывается не способно воспроизводить коллективную нейронную динамику: вместо глобальных колебаний определенной частоты, получается асинхронное поведение нейронов со стационарным распределением состояний.

Также оказывается, что диффузионное приближение некорректно описывает поведение и для модели QIF. Поэтому для воспроизведения коллективных динамических режимов, наблюдаемых в сети, ав-

торами был разработан формализм полного среднего поля, который включает в себя синаптический дробовой шум. Предполагается, что таким образом будет возможно идентифицировать все режимы, отображаемые уравнением динамики функции распределения вероятности, а также станет возможным анализ устойчивости этих режимов.

В стандартном подходе среднего поля динамика популяции описывается в терминах функции распределения вероятности $P(V, t)$:

$$\dot{P}(V, t) + \partial_V[(V^2 + I)P(V, t)] = R(t)\Delta P(V, t)$$

Основа формализма полного среднего поля состоит в следующем: эволюция модели QIF преобразуется в фазовый осциллятор путем перехода к фазе колебаний нейрона $\psi = 2\arctg(V / \sqrt{I})$, а затем, посредством ввода новой функции распределения вероятности уже для фаз, в задачу вводятся так называемые параметры порядка Курамото–Дайдо $z_n = \langle \exp(in\psi) \rangle$ [21, 22]:

$$w(\psi, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} z_n e^{-in\psi}. \quad (2)$$

Определить эти параметры можно как набор коэффициентов, который показывает степень упорядочения в системе. В том случае, когда все осцилляторы движутся случайным образом, не чувствуя друг друга, параметр порядка z_1 равен 0, в обратном случае его модуль равен 1 (полная когерентность). По построению $z_0 = 1$ и $z_{-n} = z_n^*$. Подстановка (2) позволяет перейти от рассмотрения динамики функции распределения вероятности к динамике параметров порядка, а частота испускания импульсов оказывается связанной с этими параметрами:

$$\dot{z}_n = 2ni\sqrt{I}z_n + Kv \left[\sum_{m=0}^{+\infty} I_{nm}(\alpha)z_m - z_n \right], \quad (3)$$

$$v = \frac{\sqrt{I}}{\pi} \operatorname{Re}(1 - 2z_1 + 2z_2 - 2z_3 + 2z_4 - \dots), \quad (4)$$

$$I_{nm}(\alpha) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta|=1} \frac{4(-\alpha)^m \zeta^n \left(\zeta + \frac{\alpha+2i}{\alpha}\right)^{m-1}}{\alpha(\alpha-2i)^{m+1} \left(\zeta + \frac{\alpha}{\alpha-2i}\right)^{m+1}} d\zeta, \quad \alpha = \frac{g}{\sqrt{I}}.$$

Подобный переход оправдан еще и тем, что вся динамика системы в итоге определяется лишь параметрами K и $\alpha = I^{1/2}g$, что позволяет установить все многообразие решений на двумерной фазовой плоскости.

В частности, в источнике [16] было получено стационарное решение задачи (3)–(4). Анализ линейной устойчивости позволил найти границу колебательной неустойчивости стационарного (несинхронного) режима, а слабонелинейный анализ выявил характер соответствующей бифуркации Хопфа (прямой или обратный). По-настоящему удивительным результатом оказалось следующее: в то время, когда линия бифуркаций Хопфа, найденная для диффузионного приближения, является всюду сверхкритической, та же линия, найденная в рамках подхода полного среднего поля, может быть как суб-, так и суперкритической. Это означает, что в одном диапазоне управляющих параметров могут сосуществовать асинхронный и колебательный режимы и переходы между ними носят гистерезисный характер.

Кроме того, оказалось, что существует значительная разница между двумя подходами среднего поля при малых значениях параметра $i_0 = I / \sqrt{K}$: в рамках диффузионного приближения глобальные колебания наблюдаются только при

превышении некоторого критического значения параметра K . А в рамках формализма полного среднего поля эти же колебания можно зафиксировать при любом значении K , если выполнено условие $i_0 / g_0^2 < 0.00029$.

В зависимости от того, какой порядок имеет количество входящих синаптических связей K , поведение системы может быть кардинально разным. Для относительно больших K (по-прежнему малых по сравнению с размером сети: $K \ll N$) при каждом всплеске испускания синаптических импульсов, постсинаптические нейроны получают несколько небольших тормозящих ПСП, в результате чего часть нейронов может синхронизироваться. Затем, поскольку некоторые из мембранных потенциалов теперь являются чрезвычайно когерентными (параметры порядка близки к 1), возможной оказывается нерегулярная активация других нейронов. Несмотря на флуктуации, достаточно большая часть нейронов оказывается колеблющейся с примерно одинаковым периодом. Механизм возникновения таких колебаний может быть назван дрейфовым [16], так как он слабо восприимчив к флуктуационной составляющей динамики.

Если же K , напротив, мало, то колебания в нейронной сети также могут самовозбудиться, но механизм их

возникновения меняется. Каждый раз, когда очередной нейрон испускает синаптический импульс, возникают тормозящие ПСП большой амплитуды. Они вызывают временную синхронизацию в постсинаптическом канале K и подгруппе последующих нейронов, не получавших в дальнейшем ПСП. В конечном итоге, целый кластер нейронов может одновременно достигнуть порога активации за примерно одинаковое время. Этот временный синхронизирующий эффект может быть назван «кластерная активизация» [16], он лежит в основе колебательной динамики при малых значениях K . При увеличении этого параметра амплитуда ПСП повышается, и при достижении критического значения ($K \approx 30$) тормозящий ПСП больше не способен оказать достаточно сильный синхронизирующий эффект на постсинаптические нейроны, и динамика вновь становится асинхронной.

Заключение

В настоящей статье представлен подробный анализ влияния дискретности синаптических сигналов на динамику сбалансированных нейронных сетей, теоретическое обоснование которого изложено в работе [16]. Также описан формализм полного среднего поля, который, в отличие от диффузионного приближения, оказался пригоден для полного описания макроскопической динамики

системы. В частности, он позволяет обнаружить и корректно описать гистерезисные переходы между асинхронной и колебательной динамикой. Представленный формализм пригоден для описания системы с учетом конечности времени распространения постсинаптических импульсов по сети связей и конечности их ширины.

Также посредством анализа сбалансированных нейронных сетей было выявлено два механизма возникновения глобальных осцилляций, индуцируемых дискретными синаптическими сигналами. Более того, оказалось, что добавление дробового шума приводит к появлению колебательной динамики даже в случае крайней разреженности нейронной сети.

Разработанная модель полного среднего поля (3)–(4) [16] справедлива в разреженных сетях, когда $K \ll N$ в термодинамическом пределе. В случае, если K сопоставимо с N , разреженность сети становится недостаточна, корреляции между последовательностями импульсов должны быть учтены посредством подхода, разрабатываемого в статьях [23, 24]. Также авторами [16] предложены варианты будущего обобщения формализма полного среднего поля – предполагается распространить его на более реалистичные нейронные системы, включив в него кинетику синапсов.

Библиографический список

1. Press release. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/press-release/> (дата обращения: 30.10.2024).
2. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1982. – Vol. 79. – № 8. – P. 2554–2558.
3. Ott E., Antonsen T.M. Low dimensional behavior of large systems of globally coupled oscillators // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. – 2008. – Vol. 18. – № 3. – P. 037113.
4. Watanabe S., Strogatz S.H. Constants of motion for superconducting Josephson arrays // *Physica D*. – 1994. – Vol. 74. – № 3–4. P. 197–253.
5. Gong C.C., Zheng C., Toenjes R., Pikovsky A. Repulsively coupled Kuramoto-Sakaguchi phase oscillators ensemble subject to common noise // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. – 2019. – Vol. 29. – № 3. – P. 033127.
6. Carter B. *Op Amps for Everyone* (3rd Edition). – Newnes, 2009. – 615 p.

7. *Blanter Ya.M., Büttiker M.* Shot noise in mesoscopic conductors // *Physics Reports*. – 2000. – Vol. 336. – № 1. – P. 1–166.
8. *Lucente D., Viale M., Gnoli A., Puglisi A., Vulpiani A.* Revealing the Nonequilibrium Nature of a Granular Intruder: The Crucial Role of Non-Gaussian Behavior // *Physical Review Letters*. – 2023. – Vol. 131. – № 7. – P. 078201.
9. *Hammond C.* *Cellular and Molecular Neurophysiology* (4th Edition). – Academic Press, 2015. – 444 p.
10. *Tuckwell H.C.* *Introduction to theoretical neurobiology: Vol. 2, Nonlinear and Stochastic Theories*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 265 p.
11. *Lefort S., Tómm C., Floyd Sarria J.C., Petersen C.C.* The excitatory neuronal network of the C2 barrel column in mouse primary somatosensory cortex // *Neuron*. – 2009. – Vol. 61. – № 2. – P. 301–316.
12. *Prieto J.J., Peterson B.A., Winer J.A.* Morphology and spatial distribution of GABAergic neurons in cat primary auditory cortex (AI) // *Journal of Comparative Neurology*. – 1994. – Vol. 344. – № 3. – P. 349–382.
13. *Sik A., Penttonen M., Ylinen A., Buzsáki G.* Hippocampal CA1 interneurons: an in vivo intracellular labeling study // *Journal of Neuroscience*. – 1995. – Vol. 15. – № 10. – P. 6651–6665.
14. *Richardson M.J.E., Swarbrick R.* Firing-Rate Response of a Neuron Receiving Excitatory and Inhibitory Synaptic Shot Noise // *Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 105. – № 17. – P. 178102.
15. *Iyer R., Menon V., Buice M., Koch C., Mihalas S.* The Influence of Synaptic Weight Distribution on Neuronal Population Dynamics // *PLoS Computational Biology*. – 2013. – Vol. 9. – № 10. – P. e1003248.
16. *Goldobin D.S., di Volo M., Torcini A.* Discrete synaptic events induce global oscillations in balanced neural networks // *Physical Review Letters*. – 2024. – Vol. 133. – № 23. – P. 238401.
17. *Gutkin B.* Theta Neuron Model // *Encyclopedia of computational neuroscience*. Springer. – 2022. – P. 3412–3419.
18. *Morris C., Lecar H.* Voltage Oscillations in the Barnacle Giant Muscle Fiber // *Biophysical Journal*. – 2010. – Vol. 98. – № 1. – P. 193–213.
19. *Gerstner W., Kistler W. M., Naud R., Paninski L.* *Neuronal Dynamics*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 578 p.
20. *Brunel N., Hakim V.* Fast global oscillations in networks of integrate-and-fire neurons with low firing rates // *Neural Computation*. – 1999. – Vol. 11. – № 7. – P. 1621–1671.
21. *Kuramoto Y.* *Chemical oscillations, waves, and turbulence*. – Berlin: Springer, 1984. – 158 p.
22. *Daido H.* Order Function and Macroscopic Mutual Entrainment in Uniformly Coupled Limit-Cycle Oscillators // *Progress of Theoretical Physics*. – 1999. – Vol. 102. – № 6. – P. 1213–1218.
23. *Klinshov V.V., Kirillov S.Y.* Shot noise in next-generation neural mass models for finite-size networks // *Physical Review E*. – 2022. – Vol. 106. – P. L062302.
24. *Klinshov V., Smelov P., Kirillov S.Y.* Constructive role of shot noise in the collective dynamics of neural networks // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. – 2023. – Vol. 33. – № 6. – P. 061101.

**INFLUENCE OF DISCRETE SYNAPTIC SIGNALS ON THE DYNAMICS OF
BALANCED NEURAL NETWORKS**

M.V. Ageeva, D.S. Goldobin

Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS

For citation:

Ageeva M.V., Goldobin D.S. Influence of discrete synaptic signals on the dynamics of balanced neural networks // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2024. – No 4. – P. 39–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.3>.

In 2024, the Nobel Prize in Physics was awarded for work that laid the foundation for the development of machine learning based on artificial neural networks. This event can be considered a public recognition of the role of mathematical models like the Hopfield model and the use of the

mathematical apparatus of statistical physics and quantum mechanics to describe collective dynamics in them. Despite the fact that neuronal network dynamics is mediated by discrete synaptic signals, the theoretical description of the endogenous noise in such networks is constructed within the framework of the diffusion approximation. This approach has a significant drawback, since in fact a discrete set of signals is represented as continuous Gaussian noise. It turns out that the result of this approach is the actual “blindness” of the obtained equations to some regimes of collective dynamics of the system: in particular, to the possibility of hysteresis transitions between asynchronous and oscillatory dynamics in a balanced neural network with a sparse net of connections. The paper describes a recently introduced full mean-field formalism that takes into account the effective synaptic shot noise in a sparse network of spiking neurons. Two mechanisms of global oscillations in the system depending on the degree of network sparsity are also found and explained. The developed formalism was tested on two models of neuron dynamics: quadratic integrate-and-fire neurons and the Morris–Lecar model.

Keywords: complete mean field, quadratic integrate-and-fire neurons, diffusion approximation, shot noise.

Сведения об авторах

Агеева Мария Викторовна, инженер-исследователь лаборатории подземной утилизации углерода, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614018 г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: ageeva_mv00@mail.ru

Голдобин Денис Сергеевич, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией подземной утилизации углерода, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: Denis.Goldobin@gmail.com

Материал поступил в редакцию 30.10.2024 г.

ЭТЮДЫ О НАУКЕ



ПЕРМСКАЯ ШКОЛА РУДНИЧНОЙ АЭРОЛОГИИ И ЕЁ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК РУДНЫХ ШАХТ

Л.Ю. Левин, Горный институт УрО РАН

А.В. Зайцев, Горный институт УрО РАН

Г.З. Файнбург, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Для цитирования:

Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Файнбург Г.З. Пермская школа рудничной аэрологии и её вклад в развитие теории и практики проветривания подземных горных выработок рудных шахт // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 50–60. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.4>

13 июля 2024 года исполняется 150 лет со дня рождения горного инженера, академика Александра Александровича Скочинского – выдающегося ученого и основоположника отечественной школы аэрологии горных предприятий и безопасности ведения горных работ. Сложно переоценить его вклад в становление горных наук и развитие горного производства в нашей стране, ведь все научные центры в области аэрологической безопасности, расположенные от Донбасса до Дальнего Востока, были основаны учениками Александра Александровича. Не является исключением Пермская школа рудничной аэрологии, истории образования и становления которой посвящена статья. В статье освещаются основные вехи становления аэрологии калийных рудников, основные полученные результаты, судьбы ученых, современные направления исследований. Материалы статьи вошли в сборник «Александр Александрович Скочинский. Биографический очерк. К 150-летию со дня рождения».

Пермская школа рудничной аэрологии начала формироваться во второй половине XX века. В Молотовской области (до 2 октября 1957 г. Пермская область носила название Молотовской) работали серьезные горнодобывающие предприятия Кизеловского угольного бассейна, сыгравшего исключительную роль в годы Великой отечественной войны, и Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, калий которого обеспечивал

производство калийных удобрений, а магний – производство металлического магния и титановой губки. Их развитие требовало все больше подготовленных современных кадров, поэтому осенью 1953 г. в городе был открыт Молотовский горный институт.

На Западный Урал из г. Ленинграда был направлен «десант» молодых преподавателей, среди которых был выпускник Ленинградского горного института, уче-

ник самого Владимира Борисовича Комарова, молодой горный инженер Иннокентий Иннокентьевич Медведев, защитивший в 1955 году кандидатскую диссертацию по рудничному проветриванию. Ему выпала судьба стать родоначальником Пермской школы рудничной аэрологии, начать и «поставить на ноги» научные исследования проблем проветривания калийных рудников.

Это был золотой век пара, эпоха паровых машин, пароходов, паровозов, локомотивов, паровых турбин и т.п., бурного развития сталелитейной промышленности. Всё это требовало безопасной и высокопроизводительной добычи огромного количества каменного угля на многочисленных угольных шахтах в условиях метаноопасности и дало возможность выдающемуся горному инженеру, академику Александру Александровичу Скочинскому, проявить свой гений для создания научных основ проветривания подземных горных предприятий – рудничной аэрологии.

С началом создания в Советской России в 1927 году калийной промышленности возникла острая необходимость обеспечения эффективного проветривания калийных рудников, подчиняющегося общим законам рудничной аэрологии и имеющего большое число специфических, присущих только калийным рудникам особенностей. Эти работы велись Ленинградскими учеными, а их несомненным лидером был В.Б. Комаров. Его фундаментальный труд, написанный вместе с А.А. Скочинским, «Рудничная вентиляция», впервые вышедший в свет в 1949 году и удостоенный Сталинской премии первой степени, развивал теоретические основы шахтной аэрологии и обобщал практический опыт проветривания подземных горных выработок. Многие годы он являлся учебником для студентов горных специальностей и своеобразным

справочным пособием для горных инженеров.

Специфика процессов проветривания в горных выработках калийных рудников, их существенные отличия от внешне аналогичных процессов в угольных шахтах требовали решения всех без исключения вопросов рудничного проветривания: от экспериментального определения коэффициента альфа, газоносности пород и газообильности выработок до вопросов микроклимата в гигроскопических горных породах и проветривания камер большого сечения. Таких проблем не было в угольных шахтах, однако они требовали своего научно-обоснованного решения для условий калийных рудников. Их было всего два в Советском Союзе, но их роль в народном хозяйстве страны была огромной.

Исследованиями проветривания угольных шахт занимались сотни учёных в десятках научных и высших учебных заведений. Для калийных шахт почти всё это нужно было сделать усилиями маленького коллектива выпускников первого набора студентов в Горный институт (в 1954 году). В 1960 г. Горный институт был преобразован в Политехнический (ППИ), а в 1961 году в нем появилась кафедра охраны труда и рудничной вентиляции под руководством И.И. Медведева, основной состав сотрудников состоял из первых выпускников Горного института. И они справились со своей «сверхзадачей». Научные результаты этих исследований были подведены в 1962 году в докторской диссертации И.И. Медведева «Теоретические основы и практика проветривания калийных рудников» и монографии «Проветривание калийных рудников» (1970 г.).

Выдающимся учеником И.И. Медведева стал горный инженер (впоследствии доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН) Аркадий Евге-

ньевич Красноштейн. В 1965 году он под руководством И.И. Медведева защитил кандидатскую диссертацию на новую в рудничной аэрологии тему «Исследование проветривания камер большого объема в условиях Верхнекамских калийных рудников», а с переходом И.И. Медведева на должность проректора по научной работе Ленинградского горного института по праву стал общепризнанным научным лидером формирующейся пермской школы рудничной аэрологии. Именно А.Е. Красноштейну довелось сформировать ее и вывести на мировой уровень науки.

При этом главным центром исследований проветривания калийных и каменносоляных рудников являлся Ленинградский горный институт, но по сложившейся практике его сотрудники занимались преимущественно рудниками Белоруссии и Украины, а Верхнекамскими рудниками – Пермский политехнический институт. Это было естественно, ибо А.Е. Красноштейн был любимым учеником И.И. Медведева.

Докторская диссертация (1978 год) А.Е. Красноштейна «Научные основы процессов формирования и нормализации аэрозольного и газового состава атмосферы калийных рудников» подытожила создание научных основ проветривания калийных рудников, заложила научный фундамент всей сегодняшней практики. Это был фундаментальный труд, содержащий почти все вопросы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ на калийных рудниках средствами вентиляции. Результаты этой работы послужили базисом создания и утверждения Министерством минеральных удобрений СССР и Госгортехнадзором СССР в 1985 году «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания Верхнекамских калийных рудников». Эта Инструкция стала на Верхнекамских калийных рудни-

ках полноправным дополнением и расширением действовавших Единых правил безопасности. На ее основе была разработана аналогичная Инструкция для Старобинского месторождения калийных солей в Белоруссии (1989 г).

Очень важными для практики стали разработка и утверждение новых «Специальных мероприятий по безопасному ведению горных работ на Верхнекамском месторождении калийных солей в условиях газового режима», где в отличие от классического подхода, распространяющего необходимость выполнения этих мероприятий на всю шахту, эти мероприятия распространялись только на отдельные пласты и рабочие зоны в них, отнесенные к числу опасных из-за ГДЯ. Исследования проводились В.И. Фоминых, В.Ф. Коротаевым Н.И. Захаровым, Г.З. Файнбургом и были обобщены в кандидатской диссертации В.И. Фоминых «Исследование физических процессов естественного воздухообмена в горных выработках и разработка методов оценки газовой опасности рабочих зон калийных рудников (На примере Верхнекамского месторождения)» (1990 г.)

Так постепенно на основе многолетних исследований пермская школа рудничной аэрологии стала «законодательницей мод» в проветривании калийных рудников и начала там «править бал». Создание в 1987 году Межведомственного отдела рудничной аэрологии и геофизики, а затем (в 1988 году) на его базе и Горного института УрО АН СССР во главе с А.Е. Красноштейном организационно закрепило бесспорное научное лидерство Перми.

В работах Г.Д. Поляниной, Н.Ф. Красюка, А.Н. Земскова, С.С. Андрейко, В.Ф. Коротаева и других были исследованы и определены газоносность и газобильность горных выработок Верхнекамских калийных рудников, решен ряд

принципиальных вопросов защиты от внезапных газопроявлений – выбросов и суфляров. В работах Н.Д. Лужецкой, Б.П. Казакова, А.Д. Овсянкина были исследованы вопросы микроклимата и пылевой обстановки в условиях гигроскопичности горных пород Верхнекамского месторождения.

Огромную работу провел Н.Н. Мохирев (оппонентом его кандидатской работы в 1971 г. был сам В.Б. Комаров, ласково называемый «Дед») по определению коэффициента альфа и применению методов решения сетевых задач воздухораспределения на электронно-вычислительных машинах. Его работами (в руководимую им творческую группу постоянно входили доценты Н.Г. Лукьянов и Н.А. Трофимов (кандидатская диссертация «Проветривание подготовительных выработок в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения» защищена в 1969 г.)) была создана научная и фактографическая база расчетов вентиляционных сетей калийных рудников, осуществлен поворот в сознании практиков, производителей и инспекции, постепенно привыкших к использованию вентиляторов-эжекторов для регулирования воздушных потоков в калийных рудниках.

Были исследованы даже такие (пренебрежимые в угольных шахтах, но весомые в калийных рудниках) проблемы, как «местные сопротивления», использование эжектирующих направляющих перемычек (Л.М. Веденева «Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием, 1995 г.), влияние поршневого эффекта движущегося транспорта на проветривание забоев и панелей (Л.А. Захарова «Исследование процесса возникновения поршневого эффекта в горных выработ-

ках при движении в них самоходного транспорта и его влияние на воздухораспределение», 1997 г.), влияние наклона выработок с конвейерами и нагрева их приводов на «естественную тягу» в калийных рудниках и многое, многое другое, необходимое для точного и квалифицированного расчета проветривания при проектировании и эксплуатации калийных рудников.

Ряд работ был завершён уже после безвременной смерти Н.Н. Мохирева: кандидатские диссертации М.Ю. Лисковой «Влияние выработанных пространств на аэрогазодинамические процессы при аварийных режимах вентиляции рудников» (была защищена в 2010 г.) и А.В. Николаева «Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников (2012 г.).

В работах Г.З. Файнбурга, выполненных под руководством А.Е. Красноштейна, в частности, в кандидатской диссертации «Исследование и разработка методов расчета газовой обстановки в пространственной сети горных выработок на примере Верхнекамского месторождения калийных солей» (1982 г.), впервые в мировой практике рудничной аэрологии был сформулирован, разработан, внедрен и систематически изложен принципиально новый подход к расчету проветривания. Созданный комплекс математических моделей турбулентного переноса, методов решения краевых задач тепло-массопереноса, определенных на ориентированных графах, пакетов вычислительных программ для ЭВМ позволил впервые начать решать задачи собственно «проветривания», а не только стационарного воздухораспределения.

Наиболее полно результаты исследований пермских ученых того времени были описаны в монографии И.И. Медведева и А.Е. Красноштейна «Аэрология калийных рудников» (1990 г.), ряд глав в

которой были написаны совместно с Н.Н. Мохиревым (6-8 гл.), Б.П. Казаковым (11 гл.), Г.З. Файнбургом (12-14 гл.).

Рудничная аэрология – прикладная наука и решает те или иные актуальные для производства конкретные задачи, но одновременно она развивает и общую теорию, так называемую «нетленку». Вот и пермские ученые обеспечили устойчивую работу калийных рудников нашей страны, решили множество конкретных, почти сиюминутных задач, но при этом внесли весомый вклад в общую теорию.

Детальные исследования динамики газовой обстановки, выполненные под руководством А.Е. Красноштейна В.А. Старцевым (кандидатская диссертация «Исследование проветривания Верхнекамских калийных рудников при работе оборудования с двигателями внутреннего сгорания» (1976)), показали, что в калийных рудниках идут процессы «самоочищения» рудничной атмосферы от загрязняющих «чистый» воздух примесей. В результате воздух на исходящих струях рудников зачастую становится чище «свежего» воздуха, поступающего в рудник с промплощадки.

Этот факт позволил развить три основных направления исследований, тем более, что второе направление (рециркуляция) также требовало третьего.

Первым направлением стало использование уникальной чистоты «живого» воздуха – аэродисперсной среды с соляными и радиоактивными (природных уровней) аэрозолями респирабельных размеров и породило сначала спелеотерапию в калийных рудниках, а затем и специальные поверхностные лечебно-оздоровительные комплексы, известные сегодня во всем мире под названиями «соляная пещера», «соляная палата», «спелеоклиматическая камера», «галоклиматическая камера», пионером создания конструкций которых был В.А. Старцев (1982 г.). Этот вклад

пермской аэрологии в общечеловеческую цивилизацию пока еще не оценен по достоинству, но за ним маячат огромные перспективы для массового успешного лечения аллергопатий, снижения иммунитета, постстрессорных состояний и ряда геронтологических проблем. Связанные с этим исследования аэродисперсных систем с соляными аэрозолями были отражены в работах Г.З. Файнбурга, Н.И. Алыменко, М.Т. Шарова, Л.М. Папулова, в кандидатской и докторской диссертациях К.А. Черного «Физические параметры и способы формирования биопозитивной воздушной среды» (1999 г.) и «Проблема оценки и взаимосвязи аэрозольного загрязнения и аэроионного состава воздуха рабочей зоны» (2013 г.).

Вторым направлением стало применение рециркуляционного проветривания, когда часть исходящего воздуха направляется на повторное (правильнее сказать – многократное) использование. Постановка этой проблемы в докторской диссертации А.Е. Красноштейна вызвала в свое время огромный интерес своей «эпатирующей» сущностью и научной новизной. Рассматривая эту, казалось бы, простую идею, А.Е. Красноштейн показал, что практически все основные проблемы проветривания калийных рудников могут быть технически эффективно, надежно и экономически выгодно решены раз и навсегда применением рециркуляционного проветривания. Однако для этого оно должно быть основано на отличной от классического рудничного проветривания парадигме своего концептуального основания, а его организация требует много новых знаний и умений, преодоления незыблемости положений, отстающих от развития технологий правил безопасности. В 1976-1980 гг. в работах Г.З. Файнбурга под руководством А.Е. Красноштейна на примере проветривания 4 и 5 Восточных панелей (добычной участок)

БКРУ-1 была экспериментально изучена организация контролируемой рециркуляции части рудничного поля и создана теоретическая база для её расчетов, а в 1980-х гг. Н.Н. Мохирев реализовал рециркуляционное проветривание с помощью подземного вентилятора целого рудника – СКРУ-1, находящегося на реконструкции наземного ГВУ. Это стало огромным достижением Пермской школы рудничной аэрологии.

Третьим направлением стало развитие моделей и методов расчета не только воздухораспределения, но и газовой, пылевой, микроклиматической обстановок в сети аэродинамически связанных горных выработок разных типов. Такого типа расчет особенно актуален для рециркуляционного проветривания, при котором структура потоков принципиально не может быть представлена в виде «дерева». Такой подход к расчету проветривания был развит в докторской диссертации Г.З. Файнбурга «Моделирование процессов проветривания в многосвязной системе горных выработок» (1991 г.), назван «диффузионно-сетевым» и детально рассмотрен в книге А.Е. Красноштейна и Г.З. Файнбурга «Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников» (1992 г.). Этот подход в перспективе должен стать основным в рудничном проветривании и заменить «позабойный метод», так же как последний недавно сменил «общешахтный» метод расчета потребного для проветривания количества свежего воздуха. Практика, увы, отстает от научной теории, поскольку на нее влияет «консерватизм» правил безопасности.

Таким образом, были созданы общая теория проветривания вентиляционных сетей и вычислительные методы их численного моделирования. В своей докторской диссертации «Разработка современных методов и средств обеспечения

высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями» (1994 г.) Н.Н. Мохирев подвел итоги многолетнего исследования: были определены исходные данные (коэффициент альфа, местные сопротивления) для расчета стационарного воздухораспределения, разработана теория и отработана практика использования вентиляторов-эжекторов. Однако последние были фактически запрещены ЕПБ. Нужны были активные регуляторы (источники тяги) для законного локального управления, и эта проблема была решена в работах Н.И. Алыменко, в его докторской диссертации «Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности и надежности проветривания подземных рудников с большим эквивалентным отверстием: на примере калийных рудников» (1998) созданием так называемых ППВУ (подземная передвижная вентиляционная установка). Благодаря этому появились эффективные средства локального управления проветриванием.

Докторские диссертации С.С. Андрейко «Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление» (1999 г.) и Б.П. Казакова «Ресурсосберегающие технологии управления климатическими параметрами рудников: на примере калийных рудников» (2001) невольно подвели черту под исследованиями того времени. Все эти работы были начаты еще в Пермском политехническом институте (см. соответствующие кандидатские диссертации С.С. Андрейко «Разработка методов регионального и локального прогнозирования выбросоопасных зон для условий месторождения калийных солей» (1984 г.) и Б.П. Казакова «Исследование процессов пылеподавления в калийных рудниках кондиционированием воздуха» (1973 г.)).

Новый этап развития Пермской школы рудничной аэрологии начался с создания в Перми в 1988 году Горного института УрО АН СССР под руководством А.Е. Красноштейна, образования внутри этого академического института лаборатории «Рудничной аэрологии и горной теплофизики». Нужно было готовить научные кадры и создавать новый научный коллектив. Практика организации науки во всем мире показывает, что на создание устойчивого и прогрессивно развивающегося научного коллектива уходит 10-15 лет. Так произошло и в Перми. Дополнительным стимулом развития Пермской школы стал рост числа и производительности горных предприятий различных отраслей, включая калийную промышленность. Предприятия наращивали объемы добычи, вовлекали в отработку новые, более труднодоступные запасы полезных ископаемых, невольно формируя труднопроветриваемые зоны. Все это приводило к существенному усложнению вентиляционных сетей рудников, порождало принципиально новые проблемы, требовавшие своего решения новыми нетрадиционными методами.

В период с 1998 по 2014 год лаборатория рудничной аэрологии и горной теплофизики под руководством Б.П. Казакова активно участвовала в развитии самых разных научных направлений в ответ на запросы лидеров горной промышленности.

Привлечение новых лиц привело и к расширению тематики исследований, особенно теплофизической направленности. Кроме того, усложнение современного производства требует сегодня доводить научные идеи до их практической реализации, а последняя зачастую требует дорогостоящего оборудования, больших затрат. Появилась потребность в расчете тепло-технического оборудования, проектировании и доведении разработок до состояния «под ключ».

Всё это начало реализовываться в различных проектах, научная новизна которых была отражена в кандидатских диссертациях нового поколения ученых Горного института. Приведем ряд кандидатских работ по рудничной аэрологии. Это работы А.Н. Чистякова «Струйное проветривание тупиковых выработок: На примере калийных рудников» (1999 г.), Д.Н. Алыменко «Работа вентиляторной установки комбинированного типа в рудничной вентиляционной сети» (1999 г.), А.С. Южанина «Использование специальных аэродинамических систем борьбы с внешними утечками воздуха: На примере калийных рудников» (1999 г.), А.Г. Исаевича «Физические процессы формирования свойств воздушной среды под воздействием природных калийных солей» (2000 г.), А.В. Шалимова «Исследование влияния эжекторных установок на воздухораспределение в рудничных вентиляционных сетях произвольной топологии» (2003 г.), Л.Ю. Левина «Исследование и разработка энергосберегающих систем воздухоподготовки для рудников» (2004 г.), Круглова Ю.В. «Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников» (2006 г.), А.А. Каменских «Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках» (2011 г.), А.В. Зайцева «Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников» (2013 г.), Е.Л. Гришина «Научное обоснование способов повышения надежности вентиляционных сетей подземных рудников» (2013 г.), Д.С. Кормщикова «Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников» (2015 г.), М.А. Семина «Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания» (2016 г.), С.В. Мальцева «Исследование и

разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников» (2020 г.), Д.А. Бородавкина «Расчет и управление нестационарным тепловым режимом рабочих зон длинных очистных забоев (на примере Старобинского месторождения калийных солей)» (2024 г.), Е.В. Колесова «Разработка способов управления капельной влагой в вентиляционных стволах рудников» (2024 г.).

Современная наука знает сегодня натурный эксперимент, теоретический расчет на основе математического моделирования и вычислительной компьютерной техники, а также реализацию полученных результатов в «железе» и нормативно-технической документации. И всё это есть сегодня в Горном институте УрО РАН, в котором Отдел аэрологии и теплофизики под руководством доктора технических наук, члена-корреспондента РАН Л.Ю. Левина уверенно решает множество практических задач отечественных и зарубежных подземных предприятий горной промышленности.

Системообразующую роль здесь играет разработанный в отделе программный комплекс «АэроСеть», позволяющий решать сетевые задачи проветривания сети подземных горных выработок в нормальных и аварийных ситуациях. Программный комплекс получил широкое распространение и в настоящее время применяется на более чем 120 предприятиях отрасли, включая горные предприятия, проектные институты, военизированные горноспасательные части, высшие учебные заведения.

О широте современных направлений работ отдела свидетельствует тематика докторских диссертаций последних лет: Левин Л.Ю. «Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников» (2010 г.). Круглов Ю.В. «Теоретические и тех-

нологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников» (2012 г.), Шалимов А.В. «Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников» (2012 г.), Зайцев А.В. «Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников» (2019 г.), Сёмин М.А. «Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород» (2022 г.), Исаевич А.Г. «Научное обоснование методологии управления пылевой обстановкой в горных выработках калийных рудников» (2023 г.). Об этом говорят и многочисленные научные награды и премии, полученные их авторами.

Созданные в ходе научных исследований практикоориентированные разработки нашли широкое применение на предприятиях горнодобывающих компаний ПАО «Уралкалий», ОАО «Беларуськалий», ПАО «ГМК «Норильский никель», ООО «ЕвроХим», АК «Алроса» и ряде других.

Внедрены оригинальные ресурсосберегающие системы воздухоподготовки, автоматического управления проветриванием, частичного повторного использования воздуха, обеспечившие снижение на 80 % энергетических затрат на подогрев и подачу воздуха. Реализованы разработанные центральные и местные шахтные системы кондиционирования воздуха для обеспечения безопасных условий труда по тепловому фактору при освоении стратегических запасов богатых полиметаллических руд на 2-х километровой глубине с температурами горных пород свыше 50 °С. Развернуты интеллектуальные системы термометрического контроля замораживаемого массива при строительстве выработок, обеспечившие безопасность

строительства шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

Возникшая в 1953 году Пермская школа рудничной аэрологии успешно здравствует

и полноценно развивается на благо практике проветривания рудных шахт и в целом рудничной аэрологии, научные основы которой когда-то заложил А.А. Скочинский.



Рис.1. Приезд Комарова В.Б. (в центре) в г. Пермь, в обсуждении с Медведевым И.И. (слева) и Красноштейном А.Е. (справа)

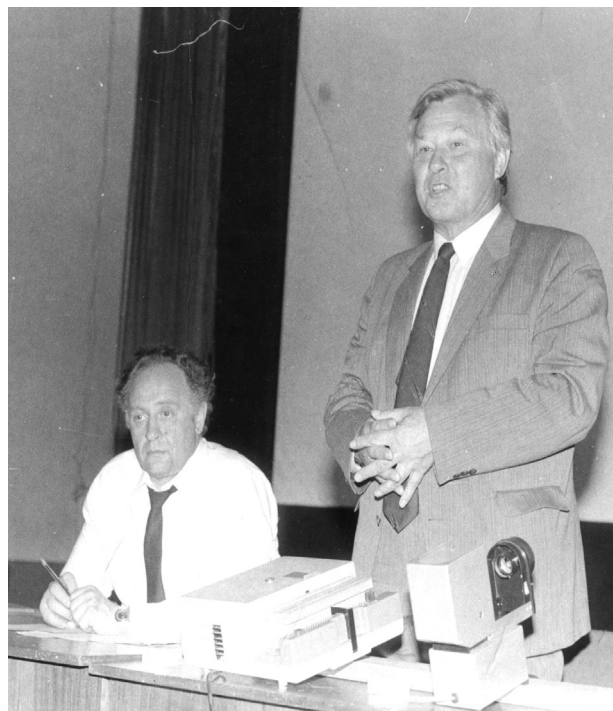


Рис. 2. Медведев И.И. (справа) и Красноштейн А.Е. (слева)



*Рис. 3. Ученики А.Е. Красноштейна и ведущие ученые Пермской школы рудничной аэрологии:
сидят слева направо: д-р техн. наук Файнбург Г.З., д-р техн. наук Казаков Б.П.,
д-р техн. наук Андрейко С.С.
стоят слева направо: канд. техн. наук Мальцев С.В., канд. техн. наук Гришин Е.Л.,
д-р техн. наук Семин М.А., чл-корр. РАН, д-р техн. наук Левин Л.Ю., д-р техн. наук Зайцев А.В.,
канд. техн. наук Паршаков О.С.*



Рис. 4. Доктор технических наук Исаевич А.Г. проводит экспериментальные измерения в шахте

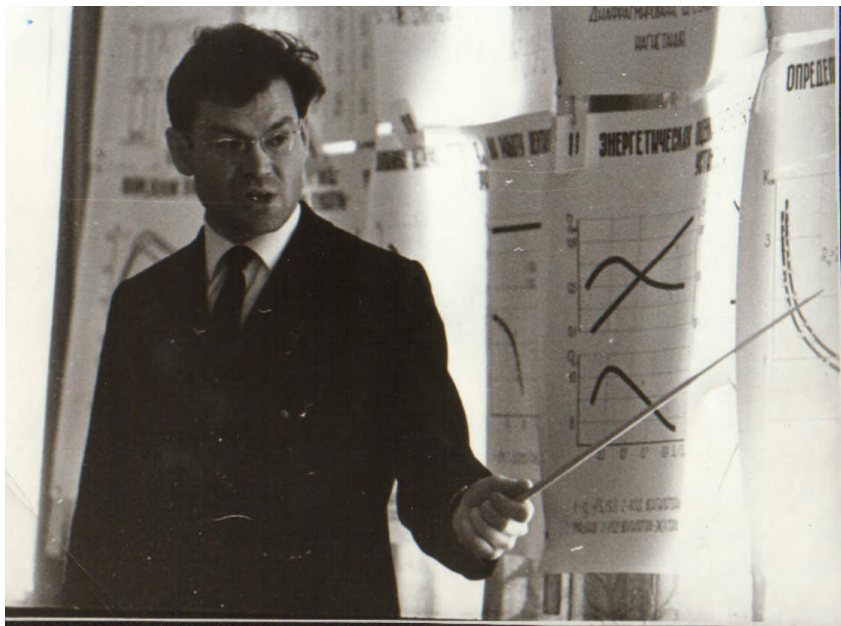


Рис. 5. Доктор технических наук, профессор Мохирев Н.Н

Сведения об авторах

Левин Лев Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: aerolog_lev@mail.ru

Зайцев Артем Вячеславович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией развития горного производства «ГИ УрО РАН»; e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru

Файнбург Григорий Захарович, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, главный научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: faynburg@mail.ru

Материал поступил в редакцию 14.09.2024 г.

ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ В КОСМОСЕ. ПЕРМСКИЙ ПЕРИОД

Любимова Т.П., *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Костарев К.Г., *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Денисова М.О., *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Любимова Т.П., Костарев К.Г., Денисова М.О. Полимеризация в космосе. Пермский период. // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 61–81. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.5>

Представлен краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в институтах Пермского научного центра УрО РАН и посвященных изучению гравитационно-чувствительных механизмов процесса полимеризации. По результатам исследований подготовлен и проведен космический эксперимент «Гель-1» (орбитальная станция «Мир», 1992 год). Используя данные выполненного эксперимента, были разработаны рекомендации для получения высокооднородных полимерных материалов и полимеров с заданным распределением физико-химических свойств, в том числе и в наземных условиях. Часть работ, начатых еще в 1990-х годах, успешно продолжается по настоящее время. В основном, это исследования особенностей отверждения композиционных материалов в условиях открытого космоса как одно из наиболее перспективных направлений создания крупногабаритных объектов вблизи Земли и на поверхности Луны.

Ключевые слова: полимеризация, гравитационно-чувствительные механизмы, космический эксперимент, полимеры с однородным распределением свойств.

Введение

Хорошо известно, что в роли основных объектов исследований в области физики, гидродинамики и материаловедения в невесомости выступают два класса явлений: гравитационно-независимые, например, термокапиллярные эффекты, и гравитационно-чувствительные. В первом случае целью эксперимента в невесомости служит изучение «чистого» феномена без побочных эффектов, вызываемых силой тяжести. Во втором случае акцент

делается на изучении фундаментальной проблемы гравитационной чувствительности или на прикладной задаче переноса процесса получения материалов в невесомость в целях улучшения как технологии, так и структуры конечного продукта.

К середине 1980-х гг. в космическом материаловедении уже сформировалась традиционная группа направлений исследований, а именно, получение полупроводниковых и белковых кристаллов, сплавов, биотехнология. Проводился

поиск и других прикладных задач, способных совершить прорыв в своей области благодаря переносу технологических процессов в невесомость. В частности, коллектив исследователей из НПО «Энергия», Института медико-биологических проблем и Института биоорганической химии АН УзССР начал на станции «Салют» (с применением установок «Светоблок») и затем продолжил на станции «Мир» серию опытов по синтезированию высокооднородных матриц полиакриламидного геля (ПАГ) с целью их дальнейшего применения на Земле для проведения электрофоретической очистки особенно ценных биопрепаратов [1]. Последнее представляло большой практический интерес, поскольку существовавшие процессы наземной биотехнологии уже тогда позволяли репродуцировать (без потери полезных свойств) биопрепараты, которые могли быть получены в относительно небольших количествах с помощью орбитальных матриц ПАГ. Анализ космических образцов ПАГ, выполненный с помощью инфракрасной спектроскопии, ЯМР и метода малоуглового рентгеновского рассеяния продемонстрировал существенные различия в ряде характеристик ПАГ, синтезированных в наземных и космических условиях. Оказалось, что степень разрешения при электрофорезе на космических образцах геля в несколько раз выше, чем на контрольных наземных [2-4]. Таким способом, например, был получен эритропоэтин со степенью очистки, недостижимой на наземных образцах ПАГ. Однако подобные великолепные результаты показывали далеко не все космические образцы геля. Часть из них по свойствам оказалась сравнимой с лабораторными образцами, а отдельные образцы – даже хуже них.

Понимая, что их уровень знаний в гидродинамике процессов, протекающих на

борту орбитальной станции, недостаточен для решения возникших проблем, авторы эксперимента организовали активный поиск специалистов, в результате которого на одной из конференций вышли на В.А. Брискмана, заведующего лабораторией гидродинамической устойчивости Института механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН). Их выбор был не случаен, так как именно В.А. Брискман в это время курировал работы по большой программе космических экспериментов, направленных на изучение гидродинамических явлений и тепломассопереноса в условиях микрогравитации [5].

Задача показалась Владимиру Абрамовичу перспективной, и он привез ее в Пермь. Предчувствия не обманули его. Уже первые тестовые опыты по визуализации течений в ходе фотоиницируемой полимеризации ПАГ в лабораторных условиях продемонстрировали наличие интенсивной тепловой и концентрационной конвекции. В свою очередь, применение теневого метода выявило существенные оптические неоднородности в образцах геля. Стало ясно, что для решения проблемы нужны планомерные исследования – как экспериментальные, так и теоретические, – причем не только исследование самого процесса полимеризации, но и уточнение методики приготовления раствора мономера, а также определение условий его хранения и транспортировки.

Определение механизмов гравитационной чувствительности процесса полимеризации

Основное внимание в подготовке нового космического эксперимента (КЭ) было уделено изучению процесса фотоиницируемого синтеза ПАГ. В опытах использовалась реакционная смесь, образованная 18%-м водным раствором акриламида с небольшими добавками

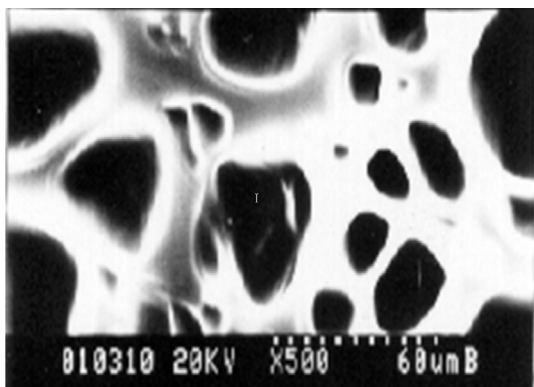
сшивающего агента (метилен-бис-акриламид, 0.46 %), катализатора (тетраметилэтилендиамин, $1 \cdot 10^{-2}$ %) и фотоинициатора (рибофлавин, $4.9 \cdot 10^{-4}$ %). В исходном состоянии реакционная смесь представляла собой прозрачную ньютоновскую жидкость с плотностью $\rho = 1.03$ г/см³ и вязкостью $\nu = 0.01$ Пз (при $T = 20^\circ\text{C}$). В результате реакции смесь превращалась в гель – прозрачный водонаполненный полимер с трёхмерносшитой пространственной сеткой (рис. 1, а).

Плотность полученного геля $\rho_r = 1.26$ г/см³. Особенности реакционного процесса были необходимость дегазации исходного раствора мономера (кислород являлся ингибитором реакции), поддержание определенного уровня кислотности буферного раствора, довольно узкий интервал температур хранения и проведения реакции. Большую помощь в решении этих вопросов оказали сотрудники Института технической химии – д.х.н. В.П. Бегишев, н.с. С.Н. Лысенко и н.с. Л.Р. Гусева.

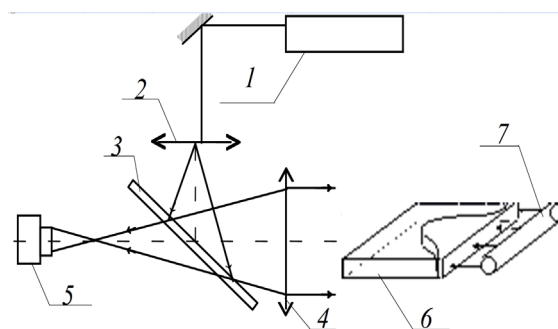
Планировалось, что эксперимент по изучению особенностей развития процесса полимеризации в условиях микрогравитации будет включен в дополни-

тельную серию КЭ на установке «Фаза», создаваемой для осуществления Программы исследования гидродинамических явлений в условиях невесомости [5]. «Фаза» представляла собой комплекс размещенных на одной раме двух независимых малогабаритных измерительных приборов – двухкоординатного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) для определения структуры и интенсивности течений и автоколлимационного интерферометра Физо для визуализации полей концентрации и температуры. Комплекс был дополнен системой измерения и поддержания температуры на основе блоков термодар и термометров сопротивления. Отметим, что интерферометр Физо создавался сотрудниками Пермского государственного университета и ИМСС УрО РАН, обладавшего в то время собственным конструкторским бюро [6].

Наличие штатного интерферометра Физо (рис. 1, б) предопределило конструкцию и размеры кюветы как для лабораторного, так и для космического эксперимента. Кювета представляла собой прямоугольную ячейку, образованную плоскопараллельными стеклами



а



б

Рис. 1. Фотография структуры полиакриламидного геля (электронный микроскоп) (а); схема интерферометра Физо (1 – лазер, 2 – микрообъектив, 3 – полупрозрачное зеркало, 4 – объектив-коллиматор, 5 – видеокамера, 6 – экспериментальная кювета в горизонтальном положении, 7 – источник иницирующего излучения (б)

толщиной 10 мм. Размеры внутренней полости кюветы 70×30×10 мм. При соответствующей настройке стекла широких граней создавали рабочую ячейку интерферометра Физо.

Основной задачей лабораторного эксперимента было определение гравитационно-чувствительных механизмов гелеобразования, выяснение характера и интенсивности их действия, оценка их влияния на развитие реакции в объеме мономера, физико-механические свойства конечного полимерного продукта и их пространственное распределение. Для достижения поставленных целей был выполнен широкий ряд опытов при нормальном уровне гравитации, в условиях пониженной интенсивности свободной конвекции, а также в условиях действия центробежного поля ($a_{\max} \sim 300 g_0$, где g_0 – ускорение свободного падения).

В результате выполненных экспериментов было выявлено наличие, по крайней мере, четырех гравитационно-чувствительных механизмов, оказывающих действие на процесс полимеризации и свойства полимера: (1) седиментация полимерных глобул в неподвижной реакционноспособной смеси [1, 7]; (2) тепловая и конверсионная конвекция мономера [8-9]; (3) неустойчивость фронта полимеризации [1, 10-11]; (4) воздействие массовых сил на полимерную сетку в процессе ее формирования [12-13]. Обнаружено, что на гидродинамической стадии процесса полимеризации действуют первые три механизма, причем седиментация – как осаждение зародышей новой (полимерной) фазы в поле массовых сил – связана с самым началом полимеризации. Неустойчивость фронта полимеризации и конвективное движение реагирующей смеси обусловлены созданием больших градиентов плотности за счет неизотермичности реакции и конверсии (превращения) жидкого мономера в полимер, об-

ладающий твердотельными свойствами. Вклад неустойчивости фронта в процесс полимеризации в значительной степени определяется взаимной ориентацией векторов движения фронта и силы тяжести, а конвекции – геометрией и размерами реактора, и, конечно, уровнем массовых сил. При этом конвекция не только перемешивает реагирующую смесь, усредняя ее по температуре и конверсии, но и влияет на формирование механических свойств возникающего полимера за счет сдвигового течения [14]. Механизм деформации возникающей полимерной сетки под влиянием массовых сил действует на стадии, когда реагирующая смесь уже потеряла текучесть, но еще не достигла максимальной конверсии. Необходимо отметить, что количество одновременно действующих механизмов гравитационной чувствительности и степень влияния каждого из них определяется исходным составом реакционноспособной смеси, способом иницирования реакции и уровнем гравитации.

На рис. 2 в качестве примера приведена серия интерферограмм раствора акриламида в ходе его полимеризации при иницировании реакции снизу путем освещения нижней грани кюветы светильником СД1-7 со спектром света, близким к ультрафиолету.

Гелеобразование начинается фронтальным образом со стороны освещаемой грани, при этом сначала возникают отдельные полимерные глобулы, концентрация которых падает по мере удаления от стенки кюветы в соответствии с экспоненциальным законом поглощения света (закон Бугера-Ламберта-Бэра). По истечении индукционного интервала времени происходит достижение пороговой концентрации глобул и начинается их сшивка в единый полимер (рис. 2, а), что сопровождается выделением тепла (рис. 3, а). Тепло разогревает снизу слой раствора

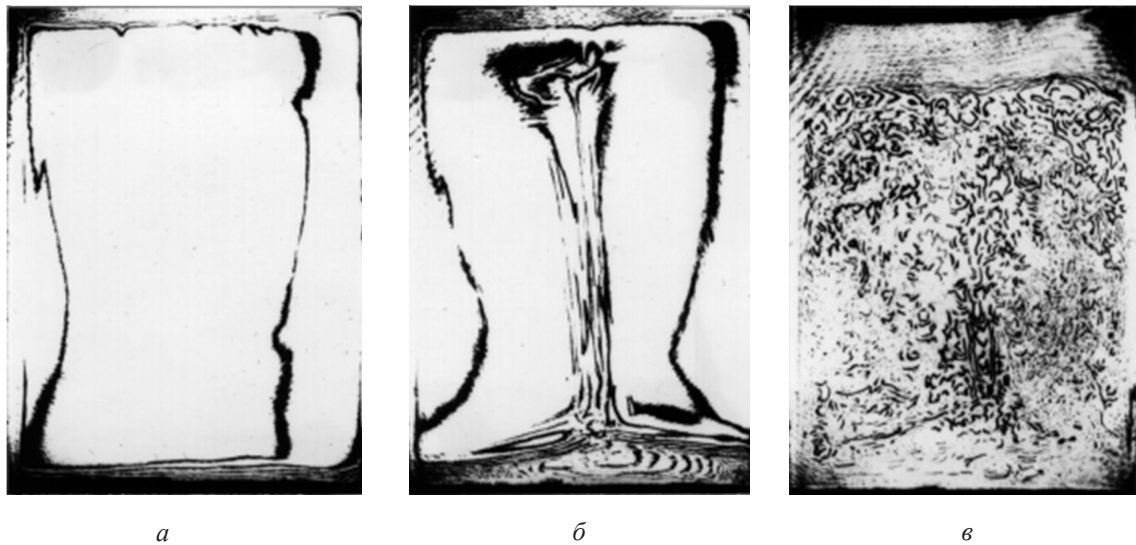


Рис. 2. Поле конверсии водного раствора акриламида в вертикальной кювете в ходе его фотополимеризации. Иницирование реакции снизу. Время с начала освещения, t , мин: 3(а); 6.5 (б); 50 (в).

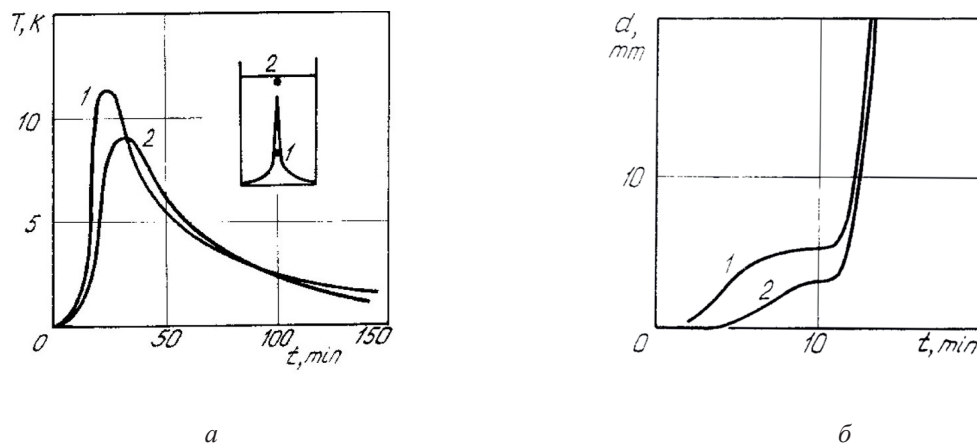


Рис. 3. Температура раствора акриламида в точках 1 и 2 (а) и положение фронта гелеобразования (б) вдоль оси вертикальной полости (кривая 1) и вблизи ее стенки (кривая 2) в зависимости от времени с начала фотоиницирования реакции снизу.

мономера со свободно плавающими глобулами, прилегающий к фронту полимера. При достижении критического перепада температуры пока еще жидкий слой испытывает релеевскую неустойчивость и начинает всплывать вверх, формируя конвективный факел (рис. 2, б). Так как возникшее течение уносит полимерные глобулы из зоны реакции, перемешивая

их с раствором мономера в объеме кюветы, то распространение фронта гелеобразования практически прекращается (рис. 3, б).

С другой стороны, продолжается как генерация новых полимерных глобул вблизи остановившегося фронта реакции, так и их перераспределение в объеме мономера. В какой-то момент времени

весь оставшийся мономер достигает критического значения конверсии и происходит одновременная полимеризация во всем его объеме (подобно случаю термически инициируемого гелеобразования). Наблюдаемый процесс сопровождается внезапной остановкой течения из-за потери текучести раствора и резким ростом температуры последнего (рис. 3, а). В химии полимеров это явление носит название «гель-эффекта» и получило научное объяснение только после нашей визуализации поля конверсии мономера и изучения его эволюции. Как видно из рис. 2, в, оптическая структура геля, сформированного в таких условиях, неоднородна и хранит следы конвективного факела.

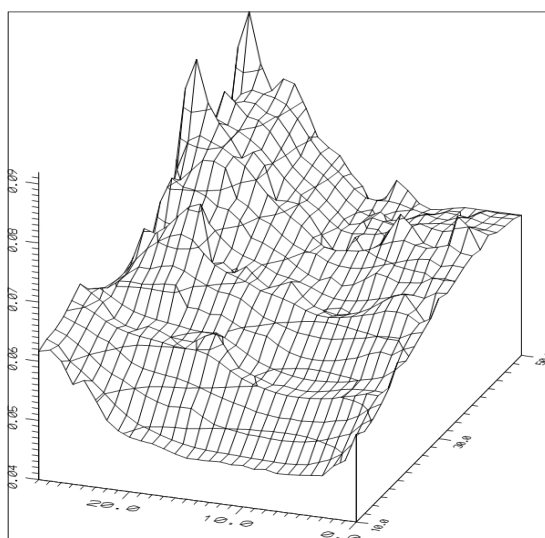
Для характеристики интенсивности конвективного течения обычно используют безразмерное число Грасгофа, величина которого определяется возникающим перепадом плотности, ускорением массовых сил, действующих в системе жидкостей, и размером объема жидкости в направлении вектора этих сил, причем имеет степенной характер ($\sim R^3$).

Как следствие, конвективное течение может быть подавлено, либо, по крайней мере, сильно ослаблено, если фронтальную полимеризацию в лабораторных условиях провести в горизонтальном слое, освещаемом сверху. К сожалению, оказалось, что для слоя толщиной 10 мм такой прием не спасает от развития конвекции. Соответственно, структура геля осталась неоднородной.

Как показали эксперименты, влияние конвекции на процесс гелеобразования не сводится только к изменению характера реакции и формированию оптических неоднородностей полимерного продукта. Так, изучение распределения упругих свойств полученных образцов геля с использованием установки для исследования дилатометрических, термомеханических и динамических характеристик полимерных материалов (ДТМД) показало, что развитие конвекции существенно повышает локальное значение модуля Юнга по сравнению с областями, где конвективное движение отсутствовало (рис. 4) [14].



а



б

Рис. 4. Интерферограмма образца геля, сформированного в результате фотоиницируемой полимеризации снизу (а) и распределение относительного модуля Юнга (б) в вертикальной кювете толщиной 4 мм. Область минимального значения модуля Юнга соответствует зоне полимеризации в неподвижном растворе мономера.

Если учесть обратно пропорциональную связь между величиной упругости и межузловым расстоянием полимерной сетки геля, то полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Основное действие конвекции на микроуровне сводится к созданию условий для образования дополнительных поперечных сшивок полимерных цепей (дополнительных по сравнению со случаем полимеризации в неподвижном мономере). Действительно, при соотношении мономера (акриламида) и сшивающего агента (метилена-бис-акриламида) как 70/1 у движущейся в буферном растворе полимерной цепи больше шансов встретиться с молекулой-сшивателем, чем у неподвижной. Кроме того, для конвекции в замкнутых полостях характерно наличие градиента скорости, нормального к направлению движения. Полимерная цепь, попав в такой поток, начинает вращаться, сворачиваясь в клубок, что сближает звенья цепи и также повышает вероятность образования поперечных сшивок.

Значительная часть времени была уделена численному моделированию теплообмена при полимеризации, способному существенно расширить область используемых химических и физико-химических параметров реакционноспособной системы [15-17]. С этой целью для описания процесса фронтальной полимеризации в поле тяжести были использованы две различные теоретические модели процесса. В первой из них описание химических превращений в системе осуществлялось с помощью феноменологического подхода. Для более полного описания процесса была использована вторая модель, основанная на детальном анализе химической кинетики рассматриваемого процесса. При построении последней был сделан ряд упрощений – предположение о квазистационарном состоянии радикалов, аппроксимация

длинных цепей, пренебрежение физическими сшивками и обрывом цепей посредством диспропорционирования. Кроме того, считалось, что константа скорости обрыва цепей является функцией эффективной вязкости, а температурные зависимости констант скоростей определяются законом Аррениуса.

Численные расчеты были выполнены методом конечных разностей для вытянутого прямоугольного параллелепипеда (ячейки Хеле-Шоу). Такая геометрия полости позволяла использовать приближение плоских траекторий и решать задачу в двумерной постановке. В качестве граничных условий принимались условия прилипания и непроницаемости и линейный закон теплоотдачи. Внешний нагрев считался отсутствующим.

Получены следующие результаты. Оказалось, что скорость фотополимеризации пропорциональна корню квадратному из интенсивности иницирующего излучения, которая уменьшается с расстоянием по мере поглощения света фотоинициатором. В условиях микрогравитации ($g \sim 0$) конвективный теплоперенос отсутствует и развитие реакции определяется только химической кинетикой. Поэтому градиенты конверсии мономера и плотности его сшивок формируются только в направлении светового луча. Изолинии плотности сшивок для данного случая приведены на рис. 5, а $Gr_T = 0$ (здесь и далее: освещается левая грань полости; средняя по объему степень сшивок $[S] = 0.75$). Упругие свойства геля пропорциональны плотности сшивок. Это означает, что распределение модуля упругости геля по образцу будет иметь вид, аналогичный изображенному на рис. 5, а. Распределение по размеру пор в образце ПАГ в этом случае также будет градиентным.

При нормальной силе тяжести ($g = 1g_0$) фотополимеризация в вертикальной полости, освещаемой сбоку,

сопровождается интенсивным конвективным теплообменом. Поскольку плотность смеси возрастает по мере ее полимеризации, то мономер с высокой степенью превращения, возникающий вблизи освещаемой поверхности, движется вниз. Это происходит на фоне резкого роста вязкости среды и увеличения скорости реакции. В результате вблизи дна полости появляется область с более высокой степенью превращения и плотностью сшивок, чем в целом по объему. Одновременно неравномерность развития реакции по объему мономера за счет поглощения света приводит к формированию горизонтального градиента температуры в полости. Возникающий при этом перепад плотности вызывает конвективное движение реакционной смеси в виде восходящего потока вблизи освещаемой грани полости. Конвекция перемешивает смесь, усредняя ее по степени превращения в ходе полимеризации. Сформированное вследствие указанных процессов распределение плотности сшивок приведено на рис. 5, б ($Gr_T \sim 10^4$).

Необходимо также отметить результаты лабораторных и численных экспериментов, в которых процесс гелеобразования проводился в центробежном поле [18-25]. Оказалось, что в таких условиях резко возрастает роль как седиментации, так и деформирования уже возникшей полимерной сетки. Показано, что степень влияния последнего механизма очень сильно зависит от стадии полимеризационного процесса, на которой образец был приведен во вращение, т.е. подвергся перегрузкам. Обнаружено, что седиментация позволяет получать образцы геля с радиальным распределением физико-химических свойств. В тоже время превышение предельного уровня перегрузок ведет к разрушению микроструктуры геля, что хорошо детектируется при измерении распределения упругих свойств образца.

В заключении этого раздела отметим, что обнаруженные механизмы гравитационной чувствительности процесса полимеризации оказались характерными и для других реакционноспособных систем [26-33].

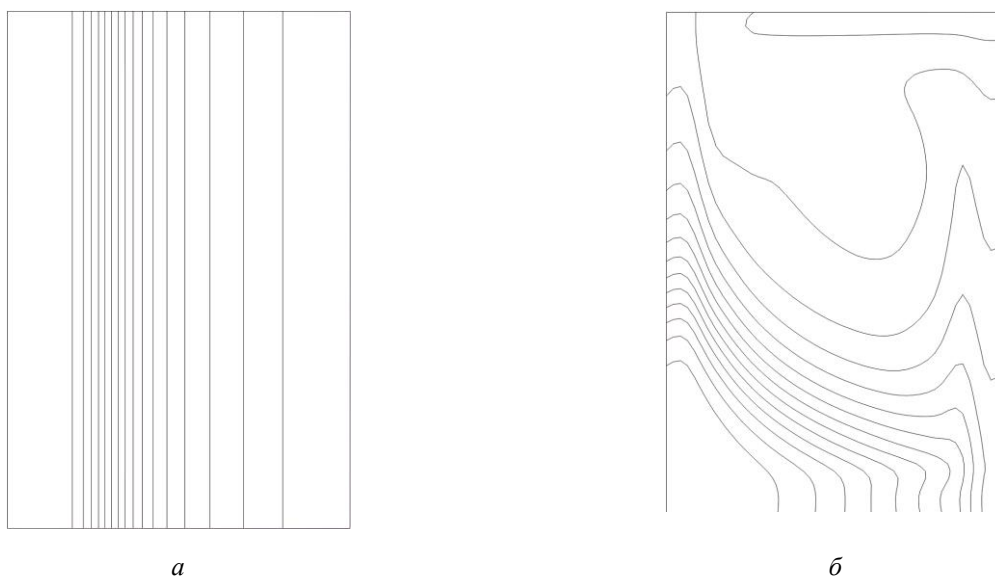


Рис. 5. Распределение плотности сшивок мономера в вертикальной кювете с иницированием реакции слева при различных уровнях гравитации. Средняя по объему степень сшивок $[S] = 0.75$. $Gr_T = 0$ (а) и $Gr_T \sim 10^4$ (б)

Космический эксперимент «Гель-1» и его результаты

Примерно за полгода до планируемой сдачи заказчиком установки «Фаза» стало известно, что ее поставка на орбитальную станцию по техническим причинам откладывается на неопределенное время. В таких условиях было принято решение провести часть планируемых КЭ, в том числе и эксперимент по полимеризации «Гель-1» [34-42], с помощью теневого прибора «Пион-М», который уже находился на станции «Мир». «Пион-М» представлял собой простейший теневого прибор, позволявший одновременно с фотографированием объекта проводить измерение его температуры. К сожалению, в нем использовался немонахроматический источник зондирующего излучения. К тому же оказалось, что в ходе одного из предыдущих экспериментов с прибора была снята и затем утеряна диафрагма в виде небольшого непрозрачного

диска, который препятствовал распространению невозмущенного пучка света после прохождения кюветы. В результате «Пион-М» мог регистрировать оптические неоднородности только с очень большими градиентами коэффициента преломления света, при которых свет после дифракции выходил за апертуру объектива кинокамеры.

Все же лабораторный эксперимент, выполненный на аналоге штатного прибора «Пион-М» непосредственно в ОАО НПО «Композит» (г. Королев Московской обл.), вселил некоторый оптимизм. Чувствительности прибора не хватало для регистрации фронта гелеобразования, но он визуализировал струи мономера с большой концентрацией полимерных глобул, вымываемых конвекцией из области вблизи фронта (рис. 6, а). Кроме того, струи, являясь центрами полимеризации, создавали существенные неоднородности конечной структуры полимера (рис. 6, б).



а



б

Рис. 6. Теневые картины кюветы с раствором мономера в разные моменты времени t , мин: 5 (а) и 30 (б). Иницирование реакции слева. Теневой прибор «Пион-М»

Таким образом, «Пион-М» мог зарегистрировать возникновение конвективного движения в ходе полимеризации. Также возлагались большие надежды на проведение интерферометрии образцов геля после их возвращения на Землю. С целью сохранения интерференционной настройки кюветы при перегрузках взлета-посадки для ее стеклянного блока была изготов-

лена жесткая оправа из дюрала, имеющая окна для наблюдения со стороны широких граней и для фотоиницирования реакции со стороны длинной узкой грани (рис. 7). Оправа крепилась в теновом приборе с помощью разъема типа «ласточкин хвост» и имела съемный светонепроницаемый чехол для предотвращения преждевременной полимеризации мономера.

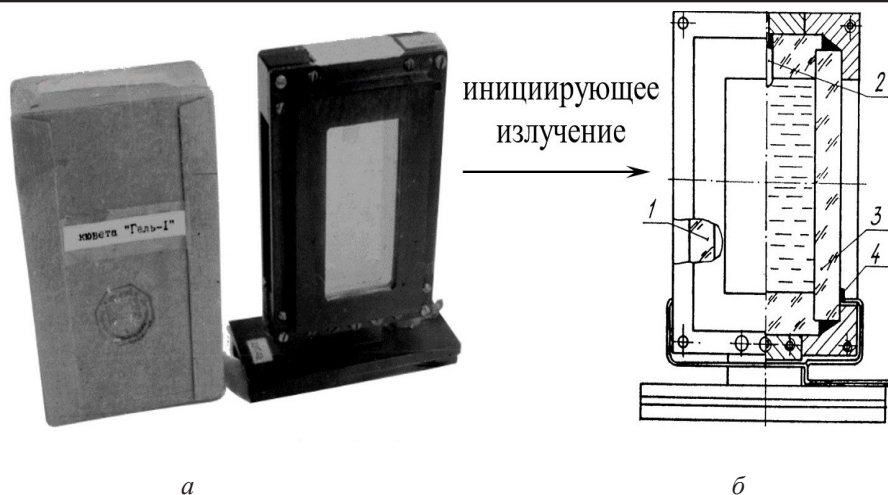


Рис. 7. Внешний вид экспериментальной кюветы с чехлом (а) и ее схема (б): вид со стороны широкой грани: 1 и 3 – боковые грани кюветы, 2 – компенсатор объемного расширения, 4 – дифференциальная термопара

Целью КЭ «Гель-1» было проведение гелеобразования в бесконвективных условиях. Как указывалось выше, интенсивность конвективного движения пропорциональна возникающему перепаду температур. В исходных КЭ полимеризация проводилась в кюветах из оргстекла, обладающего низкой теплопроводностью, и при фотоиницировании реакции со стороны широкой грани, что в результате создавало условия для разогрева мономера в ходе реакции до нескольких десятков градусов. В нашем эксперименте кювета была изготовлена из толстого стекла с высокой теплопроводностью и имела металлическую оправу, что увеличило соотношение масс реакционной смеси и модели до 1:20. Это позволило снизить ожидаемый перепад температуры до 10 градусов, что было подтверждено в лабораторном эксперименте в адиабатических условиях.

Для измерения перепадов температуры в ходе реакции использовалась дифференциальная термопара со спаями, расположенными на внешней поверхности кюветы на ее освещаемой и противоположной гранях. Еще одна термопара служила для определения температуры самой кюветы. В качестве источника,

иницирующего излучения, был применён светильник СД1-7 с освещённостью на входе в кювету $E = 940 \text{ lx}$.

Для заливки реакционной смеси кювета имела отверстие в верхней грани. Оно же использовалось для установки компенсатора объёмного расширения мономера в виде резинового колпачка. Заливка мономера в кювету проводилась в лабораторных условиях при красном свете, затем устанавливался компенсатор, положение которого фиксировалось вклеиваемой защитной крышкой. После этого надевался чехол, и кювета в таком виде помещалась в светонепроницаемый тканевый мешок с завязками. Для предотвращения самопроизвольной полимеризации рекомендованная температура хранения и транспортировки кюветы не должна была превышать 10°C . Непосредственно перед проведением КЭ мешок с кюветой извлекается из укладки и кювета в таком виде прогревается до температуры помещения в течение двух-трех часов. Кювета извлекается из мешка непосредственно перед установкой в «Пион-М». Светонепроницаемый чехол снимается с кюветы после ее установки в теневого прибор и включения кинокамеры. После этого включается светильник СД1-7. Комплект поставки – две кюветы.

Эксперимент “Гель-1” был выполнен в 1992 году на станции “Мир” экипажем в составе А.Я. Соловьёва и С.В. Авдеева. После завершения кюветы и кассеты с киноплёнкой были возвращены на Землю.

Еще до отправки кювет и проявленной киноплёнки в Пермь наши коллеги из НПО «Композит» предупредили нас о том, что из-за нехватки места кюветы для КЭ «Гель-1» не были загружены в термостатируемый контейнер, а отправлены вместе с моделями для других КЭ в еди-

ной транспортной упаковке. При этом в процессе вывода космического аппарата на орбиту произошел разогрев транспортного отсека до температуры свыше 35 °С, что привело к самопроизвольной полимеризации части раствора мономера и появлению в нем пузырьков до начала КЭ, о чем сообщили космонавты при осмотре кювет.

Действительно, осмотр кювет показал (рис. 8), что в обоих случаях произошла не только ожидаемая фотоиницируемая

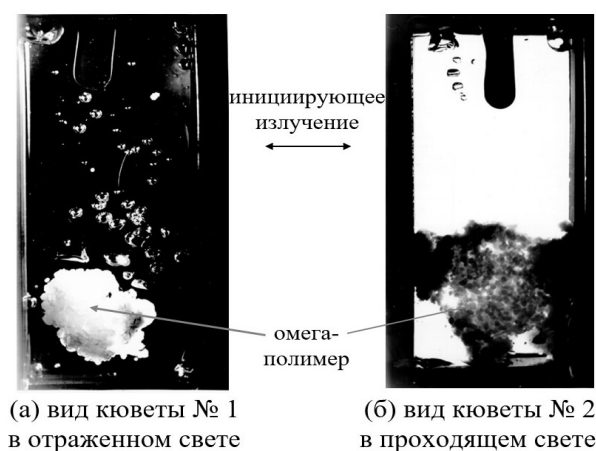


Рис. 8. Образцы геля после возвращения на Землю

полимеризация рабочих растворов, но и предшествующая ей спонтанная полимеризация с образованием так называемого омега-полимера. Результат последней реакции представлял собой непрозрачное вещество в виде скреплённых между собой белых крупинок, более плотных, чем гель, и не обладающих его свойствами. Возникновение омега-полимера при гелеобразовании носит флуктуационный характер и обусловлено появлением свободных радикалов мономера без действия инициатора. В данном эксперименте это могло быть вызвано нарушением условий хранения при транспортировке, а именно временным повышением температуры мономера до 40°С. Формирование омега-полимера снизило исходную концентрацию мономера. Как показали дальнейшие лабораторные исследования, в одном

случае (рис. 8, а) концентрация упала до 13%, во втором – до 9.5% (рис. 8, б). Отметим, что омега-полимер в обеих кюветах локализовался в одной и той же части полости. Это свидетельствует о формировании его в условиях существования гравитационного поля или при действии перегрузок. При анализе теневых фотографий кювет для моментов времени, предшествующих включению лампы-инициатора, было обнаружено, что частицы омега-полимера окружены слоем геля (рис. 9, а). Толщина слоя достигала 1–2 мм. По-видимому, этот слой стал источником гелевых глобул, также появившихся в объёме жидкого мономера. То, что реакционная смесь до фотоиницирования представляла собой жидкость, подтверждает сферическая форма газовых пузырьков. Размер пузырьков от нескольких долей до 5 мм.

На рис. 9 представлена серия фотографий кюветы в разные моменты времени с начала освещения (освещаемая грань внизу). Как видно из фотографий, газовые пузырьки остались неподвижными в ходе реакции, т.е. конвекции не было и гелеобразование протекало послойно. Как и ожидалось, теневой прибор не зарегистрировал распространения фронта реакции. Очевидно, что нижний предел чувствительности «Пиона-М» оказался выше величины максимальных градиентов конверсии во фронте полимеризации в орбитальных условиях. Такая ситуация возможна, если во фронте гелеобразования происходит плавное – без резких скачков – нарастание конверсии. Дополнительным фактором явилось снижение начальной концентрации мономера за счёт омега-полимеризации.

Хотя прямое наблюдение распространения фронта гелеобразования оказалось невозможным, продвижение реакции в объёме мономера удалось проследить, используя пузырьки, возникшие в ходе омега-полимеризации.

Рассмотрим пузырёк, освещённый параллельным световым пучком с интенсивностью I_0 . Поскольку коэффициент преломления света в пузырьке меньше, чем у окружающей его жидкости, то пузырёк для такого светового пучка играет роль рассеивающей линзы. На рис. 10 приведено схематическое распределение интенсивности света за пузырьком в сечении А-А. Как видно из рисунка, в этом сечении происходит наложение двух световых потоков – первоначального с интенсивностью I_0 и рассеянного газовой пузырьком. Резкий перепад интенсивности вдоль границы “тени” пузырька порождает соответствующий перепад степени полимеризации. Этот градиент и воспринимает теневой прибор. Поскольку предел чувствительности теневого прибора соответствует определённому градиенту конверсии, то можно проследить распространение этой степени превращения в зависимости от логарифма времени с момента инициирования реакции (рис. 10, б). Из приведённого рисунка видно, что в условиях

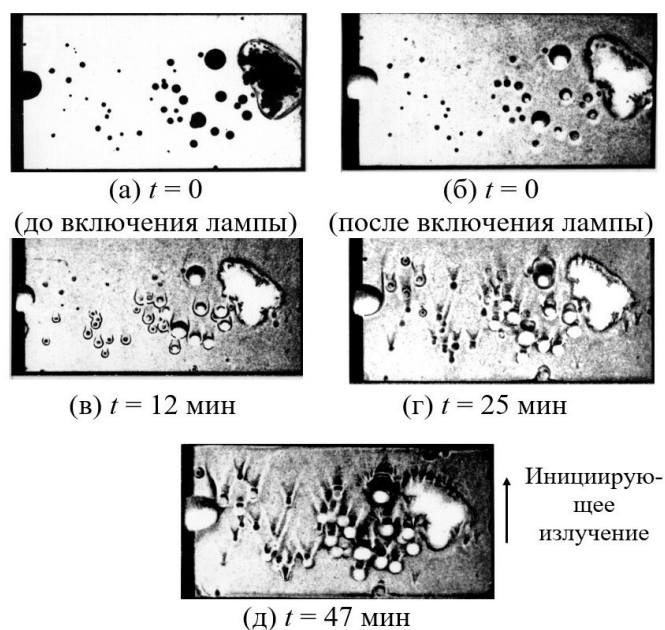


Рис. 9. Фотографии раствора акриламида в процессе гелеобразования в микрогравитации

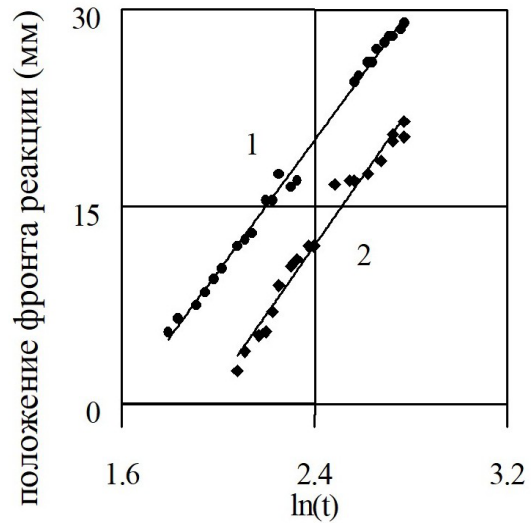
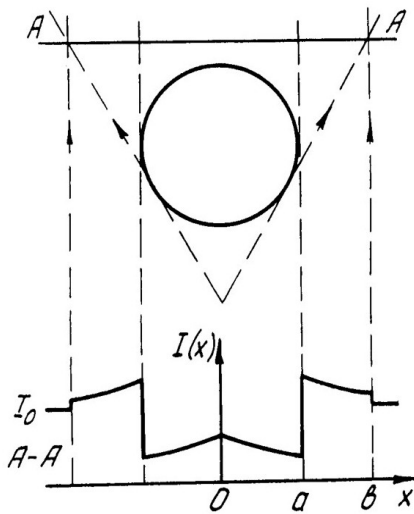


Рис. 10. Распределение интенсивности света позади пузырька газа в сечении A-A, B – мнимый фокус рассеивающей линзы (пузырька) (а) и положение фронта гелеобразования в зависимости от логарифма времени. Концентрация акриламида в растворе: 1 – 13%, 2 – 9.5% (б)

микрогравитации, как и на Земле, изменение конверсии реагирующей смеси наступает не сразу, а спустя определённое время, необходимое для инициирования реакции (индукционный период). Наличие омега-полимера в объёме мономера увеличило время инициирования реакции t_0 в объёме мономера. Так, если в лабораторных условиях при концентрации мономера $C_0 = 18\%$ $t_0 \sim 4-5$ мин., то в КЭ $t_0 \sim 6-7$ мин. ($C_0 = 13\%$, кювета №1) и $t_0 \sim 7-8$ мин. ($C_0 = 9.5\%$, кювета №2). Отметим, что индукционный период больше у раствора мономера, в котором находится более крупный омега-полимер.

Как показывает рис. 10, б, поведение экспериментальной зависимости распространения определенной степени конверсии в пределах погрешности хорошо описывается логарифмическим законом $d/d_0 = A \ln t + B$, где d_0 – размер кюветы вдоль направления инициирования, A и B – константы. Уравнение было предложено авторами на основе феноменологической модели распространения фронта полимеризации в отсутствии конвективного те-

пломассообмена и является вариантом аналитического решения, полученного В.В. Ивановым в 1991 году для этой ситуации [43]. Согласно его решению

$$A = \frac{2}{\varepsilon}; \quad B = \frac{2}{\varepsilon} \left[\ln(k_p (\varphi \varepsilon I_0 c_0 / k_0)^{1/2}) - \ln \ln \frac{M_0}{M} \right]$$

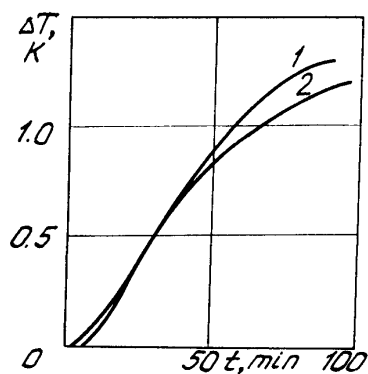
где ε – коэффициент экстинкции, I_0 – интенсивность падающего света, φ – квантовый выход реакции инициирования, M_0 и c_0 – начальные концентрации мономера и инициатора, M – концентрация мономера во фронте, принятая в качестве метки, k_p и k_0 – константы скорости роста и обрыва цепей.

Результаты тепловых измерений оказались весьма предсказуемыми. Температурные кривые (рис. 11, а) имели такой же вид, что и лабораторные, полученные в адиабатических условиях. Хороший тепловой контакт кювет и теневого прибора и значительное уменьшение исходной концентрации мономера снизили разогрев кюветы до 1.5 К. Действием прошедшей омега-полимеризации также объясняется сдвиг максимума температуры

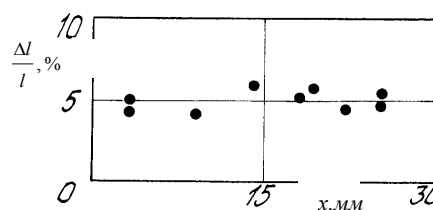
в область больших времен (в адиабатических условиях на Земле пик температуры достигался при $t = 25$ мин).

Изучение распределения физико-механических свойств полученных образцов геля было выполнено с помощью прибора УИП. С этой целью из образца вдоль направления облучения в области, вблизи которой не было пузырьков и

омега-полимера, была вырезана последовательность проб в виде цилиндров диаметром 4 мм и высотой 5 мм. Пробы подвергались деформации сжатия. Результаты испытаний приведены на рис. 11, б. Как и ожидалось, образец оказался более однородным, чем его лабораторные аналоги. Как упоминалось выше, конструкция штатных кювет позволяла



а



б

Рис. 11. Изменение перепада температуры в кювете (а) и распределение относительного сжатия вдоль направления иницирования в орбитальном образце геля (б). Кювета №1

использовать их в качестве рабочих ячеек интерферометра Физо. К сожалению, неточность в изготовлении оправ не позволила настроить кюветы на интерференционную полосу бесконечной ширины. Выбранный вариант настройки создавал оптический клин в 10 полос для кюветы №2 и 150 полос – для кюветы №1. Полосы располагались параллельно освещаемой грани. В ходе КЭ изменилось как число, так и ориентация интерференционных полос. На рис. 12, а приведена интерферограмма геля, занимающего центральную часть кюветы №2. Здесь освещаемая грань сверху, слева – омега-полимер, справа – гелевые глобулы. Изменился наклон полос, что обусловлено воздействием омега-полимера, но число полос вдоль направления иницирующего света не увеличилось по сравнению с контрольной интерферограммой до полёта. Это означает, что возникший гель значительно однороднее лабораторных образцов.

Будучи освещенными, омега-полимер, гелевая частица и газовый пузырек не только поглощают или пропускают свет, но и отражают его. Отраженный свет усиливает интенсивность иницирующего излучения перед рассеивающими объектами. Как следствие, здесь создаются условия для гелеобразования, опережающего общую реакцию. Начав раньше формироваться, гель в этой области достигает более высокой степени превращения за время фотоиницирования. Возникшие неоднородности поля конверсии хорошо видны на фотографиях в виде коллинеарных полос, расположенных перед освещаемыми объектами и повторяющих их профиль (рис. 12, а-б).

Противоположная ситуация складывается в области “тени” объектов. Здесь полимеризация протекает медленнее, чем в объеме, и поэтому степень превращения несколько ниже средней (на рис. 12, б эти зоны имеют вид системы концентриче-

ских кругов, расположенных за газовыми пузырьками).

Одним из побочных результатов КЭ стала возможность оценить влияние включений различного рода (газовых пу-

зырьков, твердых прозрачных и непрозрачных частиц), находящихся в растворе мономера, на формирование неоднородностей упругих свойств и конверсии мономера в ходе фотополимеризации. Дело

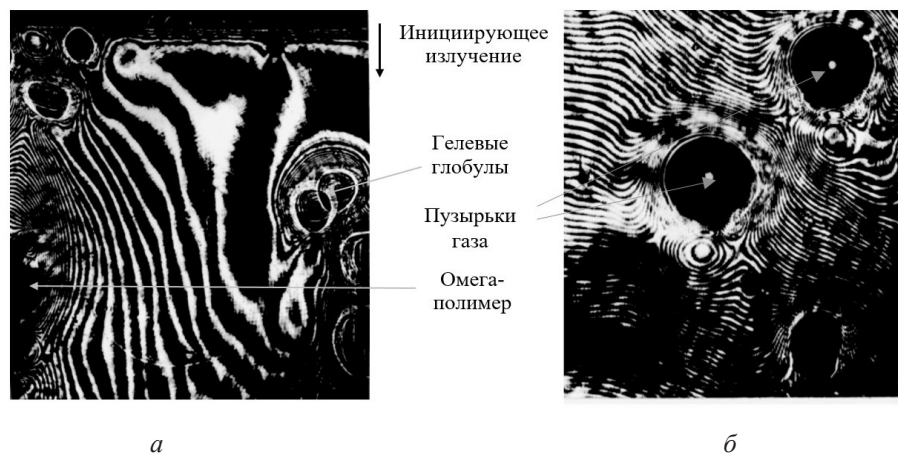


Рис. 12. Интерферограммы неоднородностей поля конверсии мономера, вызванных формированием омега-полимера и полимерных глобул, а также и пузырьков газа

в том, что такие включения, как правило, имеют другую плотность, чем исходный раствор мономера, и, соответственно, в лабораторных условиях всплывают или тонут в нем, чего не происходит в условиях невесомости. Подобные включения, безусловно, вредны при создании высокооднородных полимерных материалов, но бывают необходимы для решения ряда технологических проблем (в первую очередь, при создании композиционных материалов и лекарств).

Полученные результаты КЭ, в частности, позволили выявить особенности изменения формы пузырьков и сопоставить их со стадиями процесса полимеризации [44]. Показано, что на начальном этапе реакции появление неоднородностей геля, вызывающих деформацию пузырька, обусловлено отражением и рассеиванием иницирующего света его поверхностью и, соответственно, разной скоростью гелеобразования вблизи нее. Сам пузырек при прохождении фронта

полимеризации остается неподвижным, но продолжает деформироваться. Его дальнейшая деформация связана с неоднородным развитием реакции в уже возникшем геле. Установлены зависимости изменения диаметров пузырьков вдоль и поперек направления иницирующего излучения (рис. 13, а), а также величины эксцентриситета пузырьков от времени с начала реакции (рис. 13, б). С помощью интерференционного метода определен характерный размер неоднородностей структуры геля, возникающих в окрестности прозрачного включения.

Таким образом, КЭ "Гель-1", несмотря на произошедшую омега-полимеризацию, практически выполнил все свои задачи. Показано, что в условиях орбитального полета при соблюдении ряда ограничений можно достичь фронтального развития фотоиницируемой полимеризации в достаточно больших объемах раствора мономера без возникновения конвективного движения. Впервые,

используя оптические методы, было определено уравнение распространения фронта полимеризации. В лабораторных условиях подробно изучена оптическая структура образцов, установлены причины появления неоднородностей и их характер.

Основным результатом КЭ стало то, что принятые ограничения, проверенные в ходе орбитального полета, позволили

проводить фронтальную фотополимеризацию без развития конвекции и в лабораторных условиях [45-46]. На рис. 14, а представлено распределение конверсии мономера во фронте гелеобразования, который распространялся со временем от освещаемого торца горизонтально лежащей ячейки Хелле-Шоу толщиной 1 мм. Толстые стекла, образующие эту ячейку, и массивная ме-

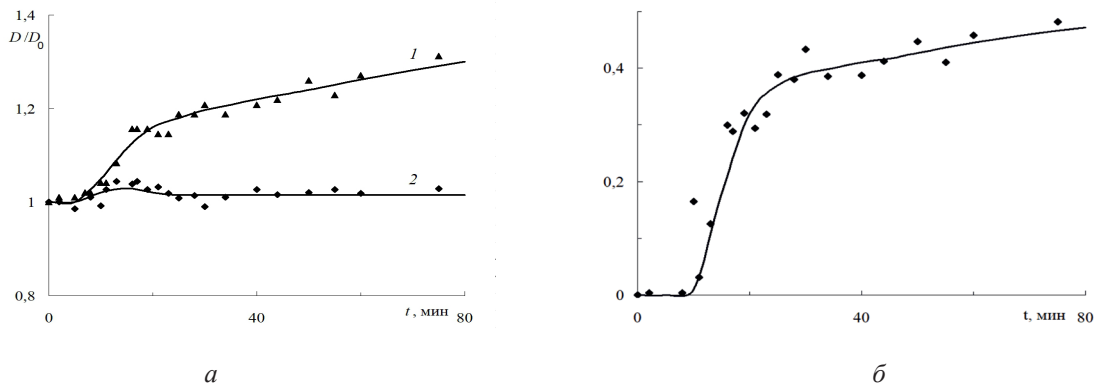


Рис. 13. Относительное изменение диаметров пузырька с $D_0 = 4.2$ мм вдоль (1) и поперек (2) светового потока (а) и зависимость эксцентриситета пузырька (б) от времени с начала иницирования реакции

таллическая подложка обеспечили хороший теплоотвод из зоны реакции, что дало возможность провести полимеризацию в неподвижном мономере. Исходя из данных КЭ, был определен характерный параметр – индукционный период t_0 реакции, используя который для обезразмеривания времени с момента начала фотоиницирования, можно оценить влияние начальной концентрации мономера на скорость распространения фронта полимеризации и вклад конвективного движения в этот процесс (рис. 14, б). К сожалению, эксперимент «Гель-1» не получил дальнейшего развития в связи с ухудшением финансового положения страны и космической отрасли, в частности. Насколько известно, этот эксперимент остается единственным в мире, в котором были использованы оптические

методы для изучения фундаментальных основ процесса полимеризации в условиях микрогравитации.

Полимеризации композитных материалов в открытом космосе

Повторный всплеск интереса к полимеризации в невесомости произошел недавно, в связи с развитием ряда государств, претендующих на звание ведущих экономик мира. В числе основных целей ими заявлены строительство собственных орбитальных станций и освоение ближайших планет с целью их колонизации и добычи полезных ископаемых. В рамках поставленных целей сейчас наиболее интенсивно развиваются два направления – проведение полимеризации композитных материалов в открытом космосе [47] и использование 3D-принтеров на борту космических

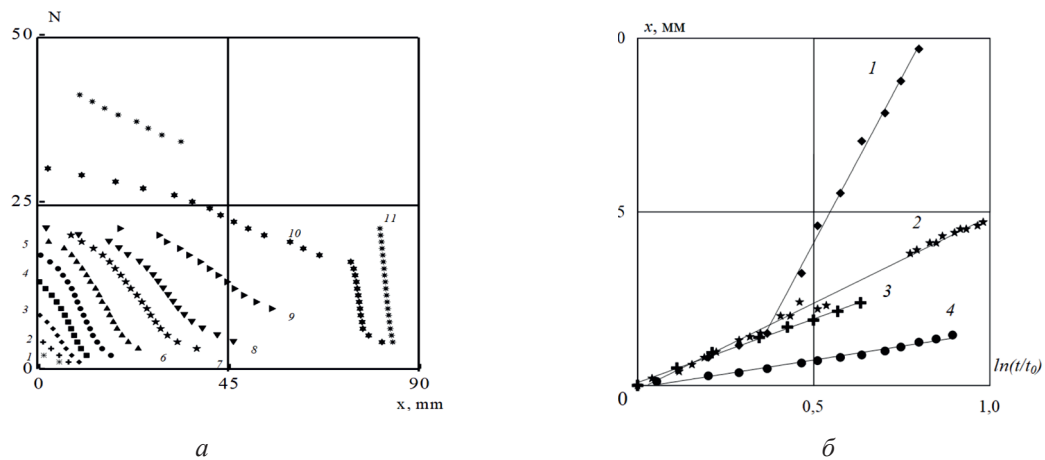


Рис. 14. Распределение конверсии ПАГ (1 полоса = 2%) вдоль образца в ходе реакции в отсутствие конвекции (толщина реактора 1 мм) t , мин : 1 – 1.0; 2 – 2.5; 3 – 4.5; 4 – 7.5; 5 – 12.5; 6 – 18.5; 7 – 28; 8 – 36; 9 – 46 (отключение инициирующего освещения); 10 – 1 ч 30 мин; 11 – 24 ч (а) и распространение фотополимеризации ПАГ в горизонтальной кювете при различных уровнях гравитации: 1 – граница реакции в условиях слабой конвекции реакционной смеси с $C_0 = 18\%$ (толщина реактора $a = 10$ мм), 2 – фронт в условиях микрогравитации при $C_0 = 13\%$ ($a = 10$ мм); 3 – в лабораторных условиях при подавлении конвекции ($a = 1$ мм); 4 – фронт в условиях микрогравитации при $C_0 = 9.5\%$ ($a = 10$ мм) (б)

аппаратов [48]. Реализация задач первого направления позволит создавать крупногабаритные объекты (корпуса космических аппаратов и стационарных сооружений) непосредственно в космосе и на Луне. Действия в рамках второго направления предоставят возможность производить комплектующие для ремонта и создания оборудования, необходимого для обеспечения жизнедеятельности экипажей, прямо на борту орбитальных станций.

Отметим, что первое направление неразрывно связано с работами к.ф.-м.н. А.В. Кондюрина, который первым сформулировал задачи использования полимеризации (а точнее отверждения) композитных материалов в открытом космосе для создания больших объектов. Он же и провел первые лабораторные эксперименты по оценке влияния вакуума, перепадов температуры и ионных пучков на процессы формирования препрегов (образцов тканых материалов, пропитанных полимерными смолами) и на интенсивность их деструкции [49-50].

Позже А.В. Кондюрин переехал в Германию, а затем и в Австралию, где продолжил исследования особенностей отверждения эпоксидных композитов в условиях высокого вакуума, больших перепадов температуры, плазмы тлеющего разряда, ионных пучков высокой энергии, наличия атомарного кислорода. Их воздействие было проверено в ходе цикла полетов стратостатов в 2009-2014 годах в Австралии и России. Полученные данные в целом подтверждают результаты лабораторных экспериментов [51]. В настоящее время А.В. Кондюрин активно сотрудничает по данной проблематике с группой научных работников под руководством д.ф.-м.н. А.Л. Свисткова, заведующего лабораторией Микромеханики структурно-неоднородных сред ИМСС УрО РАН [52].

Библиографический список

1. Садыков А., Леонтьев В., Мангутова Ю., Гречко Г., Машинский А.Л., Нечитайло Г.С. // Доклады АН СССР –1983 – № 303 – С. 1004–1007.
2. Абдурахманов Ш.Д., Богатырева Л.Г., Брискман В.А., Любимова Т.П. [и др.] О структурообразовании полиакриламидных гелей при фотоинициации в наземных и орбитальных условиях // В сб. научных трудов Численное и экспериментальное моделирование гидродинамических явлений в невесомости. – Свердловск, 1988. – С. 123–127.
3. Богатырева Л.Г., Брискман В.А., Левкович М.Г., Леонтьев В.Б., Любимова Т.П., Нечитайло Г.С. Гравитационно–чувствительные механизмы при структурообразовании полиакриламидных гелей // Космическая наука и техника. – 1989. – Вып. 4. – С. 43–47.
4. Абдурахманов Ш.Д., Бабский В.Г., Богатырева Л.Г., Брискман В.А., Левкович М.Г., Леонтьев В.Б., Любимова Т.П., Машинский А.Л., Нечитайло Г.С. Структурообразование полиакриламидных гелей при фотоинициации в наземных и орбитальных условиях // XIX Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. – Москва: Наука, 1990. – С. 219 – 228.
5. Бармин И.В., Брискман В.А., Полежаев В.И. Программа экспериментов на установке для исследования гидродинамических явлений в условиях невесомости // Изв. АН СССР. Серия физическая. – 1985. – Т. 49. – № 4. – С. 698.
6. Бурштейн Б.И., Костарев К.Г., Подковырина З.П., Пшеничников А.Ф. Оптические приборы для исследования тепломассообмена в невесомости // Численное и экспериментальное моделирование гидродинамических явлений в невесомости. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – С. 108–112.
7. Briskman V.A., Kostarev K.G. Shmyrov A.V. Mechanisms of Polymerization Sensitivity to Gravity // First Int. Symp. on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Sorrento, Italy: ESA SP – 454, 2001. – P. 655–662.
8. Bogatyreva L., Briskman V., Kostarev K., Leontyev V., Levkovich M., Lyubimova T., Mashinsky A., Nechitailo G., Righetti P.G. Heat/Mass Transfer Mechanisms of the Polymerization under Terrestrial and Microgravity Conditions // Proc. VIII European Symposium n Material and Fluid Sciences in Microgravity. – Brussels: ESA SP–333, 1992. – Vol.1. – P.173–178.
9. Righetti P.G., Bossi A., Giglio M., Vailati A., Lyubimova T., Briskman V.A. Is gravity on our way? The case of polyacrylamide gel polymerization // Electrophoresis. – 1994. – Vol.15. – P.1005–1013.
10. Kostarev K.G., Yudina T.M. Effect of Gravity on Heat and Mass Transfer in Polymerization // Heat Transfer Research. 1996. Vol. 27, № 5–8, P.379–382.
11. Костарев К.Г., Мошев В.В., Гусева Л.П., Брискман В.А. Гравитационная чувствительность процессов полимеризации // Пластические массы. – 1997. – № 8. – С. 12–16.
12. Briskman V.A., Kostarev K.G., Moshev V.V., Lyubimova T.P [et al.] Basic mechanisms of gravitational sensitivity of the polymerization process // Joint Xth European and VIth Russian Sumposium on Phyzical Sciences in Microgravity. St.Peterburg. Russia, 1997. – P. 244–247.
13. Briskman V.A. Gravitational Effects in Polymerization // Space Res. – 1999. – Vol. 24. – №. 10. – P. 1199–1210.
14. Костарев К.Г., Юдина Т.М., Писцов Н.В. Влияние свободной конвекции на формирование структуры и свойств полиакриламидного геля // Высокомолекулярные соединения, Серия А. – 2000. – Т. 42. – № 11. – С. 1910–1917.
15. Lyubimova T.P. Polymerization under terrestrial and orbital conditions. Comparative study // Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity. – Perm – Moscow, Russia, 1991. – P. 387–396.
16. Lyubimova T.P., Righetti P.G. On the kinetics of photopolymerization: a theoretical study // Electrophoresis. – 1993. – Т. 14. – №1. – С. 191–201.
17. Корлекова Е.Б., Любимова Т.П. Математическое моделирование тепломассообмена при образовании полиакриламидного геля // Нелинейные задачи динамики вязкой жидкости. Свердловск: УрО РАН, 1990. С. 46–54.
18. Briskman V.A., Kostarev K.G., Lyubimova T.P. Gel polymerization under high gravity conditions // In: Materials Processing in High Gravity., Ed. L.L.Regel, Plenum Press, N.Y. USA, 1994 (Proceedings of the II Int. Workshop on Materials Processing in High Gravity, (June 6–12, 1993) Potsdam, N.Y.,US), P. 185–192.

19. *Briskman V.A., Kostarev K.G., Yudina T.M.* Comparative investigations of thermal and photopolymerization under action of centrifugal forces. Basic mechanisms of heat/mass transfer // in: *Centrifugal Materials Processing*. Ed. L.L.Regel, Plenum Press.N.Y.1997, P. 247–255.
20. *Briskman V.A., Kostarev K.G., Shmyrov A.V.* Utilization of microgravity and high gravity to prepare materials with controlled properties // in: *Processing by Centrifugation.*/ Ed.L.L.Regel&W.R.Wilcox, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2001, NY,USA, P. 127–132.
21. *Kostarev K.G., Shmyrov A.V.* Polymer Synthesis in Centrifugal Field. // in: *Processing by Centrifugation* // Ed.L.L.Regel&W.R.Wilcox. Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2001, NY,USA, P. 121–125.
22. *Briskman V., Kostarev K., Shmyrov A.* High gravity as research tool in studying the nature of structure formation in polymers // *Advances in Space Research*. – 2002. – Vol. 29. – №4. – P. 599–607.
23. *Костарев К.Г., Шмыров А.В.* Влияние седиментации на возникновение и развитие конвекции при полимеризации гелей в центробежном поле // *Конвективные течения*. – Пермь: ПГПУ, 2003. – С. 175–184.
24. *Гусева Л.Р., Костарев К.Г., Юдина Т.М.* Гелеобразование в центробежном поле // *Пластические массы*. – 2004. – № 4. – С. 38–41.
25. *Шмыров А.В., Костарев К.Г.* Конвекция жидкого мономера в процессе фотополимеризации гелей в центробежном поле // *Конвективные течения*. Пермь: ПГПУ, 2005. – С. 60–72.
26. *Голубев В.Г., Громов Д.Г., Гусева Л.Р., Любимова Т.П., Костарев К.Г.* О роли свободно-конвективного теплообмена в процессах синтеза полимерных материалов // *Материал. конф «Теплообмен – ММФ–92»*. – Минск: БелАН, 1992. – Т. 5. – С. 66–70.
27. *Golubev V.B., Gromov D.G., Guseva L.R., Korolev B.A., Kostarev K.G., Lyubimova T.P.* Free convective heat and mass transfer in processing polymer materials // *Heat Transfer Research*. – 1993. – Vol. 25. – №. 7. – P. 888–893.
28. *Бегишев В.П., Гусева Л.Р., Костарев К.Г., Малкин А.Я.* Неоднородность отверждения олигомеров, обусловленная конвективными явлениями // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. – 1994. – Т. 36. – №. 5. – С. 759–766.
29. *Иванов В.В., Бегишев В.П., Гусева Л.Р., Костарев К.Г.* Критерий фронтального характера фотополимеризации при постоянном коэффициенте экстинкции и ограниченном массопереносе // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. – 1995. – Т. 37. – № 6. – С. 1064–1067.
30. *Guseva L.R., Ivanov V.V., Kostarev K.G., Yudina T.M.* Photo-polymerization in the system butyl glycidyl ether-ferrocene complex in forced quasi-frontal regime // *Russian Polymer News*. – 1998. – Vol. 3. – №. 2. – P. 25–28.
31. *Иванов В.В., Гусева Л.Р., Костарев К.Г., Пуцаева Л.М.* Механизмы типа вынужденной бегущей волны при полимеризации // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. – 1999. – Т. 41. – №. 7. – С. 1102–1109.
32. *Gelfi C., de Besi P., Alloni A., Rigetti P.G., Lyubimova T., Briskman V.* Kinetics of acrylamide photopolymerization as investigated by capillary zone electrophoresis // *J. of Chromatography*. – 1992. – Vol. 598. – P. 277–285.
33. *Lyubimova T., Caglio S., Gelfi C., Righetti P.G., Rabilloud Th.* Photopolymerization of Polyacrylamide Gels with Methylene Blue // *Electrophoresis*. – 1993. – Vol. 14. – P. 40–50.
34. *Briskman V.A., Kostarev K.G., Lyubimova T.P. [et al.]* Polymerization under different gravity conditions // *45th Congress of Int. Astronautical Federation 1994*. Paper IAF-94-J.4.257, Jerusalem. Israel, 1994, 12 P.
35. *Briskman V.A., Kostarev K.G.* Gravity sensitive mechanisms of polymerization and gel formation. Ways for controlling final material properties // *Proceedings of the Int. Aerospace Congress IAC-94*. 1994, Moscow. Russia, 1995, Vol.1. P.514–525.
36. *Briskman V.A., Kostarev K.G., Levto V.L. [et al.]* Comparative experimental research of polymerization on the “MIR” orbital station and on the Earth // *33rd Aerospace Sciences. Meeting and Exhibit*. 1995. Paper AIAA.95-0263, Reno. NV., 1995, 8 P.
37. *Briskman V.A., Kostarev K.G., Lyubimova T.P., Levto V.L., Mashinsky A.L., Nechitailo G.S., Romanov V.V.* Polymerization under different gravity conditions // *Acta Astronautica*, 1996. Vol.39, №5, pp.395–402.
38. *Briskman V.A., Kondyurin A.V., Kostarev K.G., Leontyev V.L., Levkovich M., Mashinsky A.L., Nechitailo G.S., Yudina T.M.* Polymerization in microgravity as a new process in space technology // *48th International Astronautical Congress*, 1997. Paper IAA-97-IAA.12.1.07, Turin, Italy, 12 P.

39. *Briskman V.A., Kostarev K.G.* Polymer under microravity conditions: Results and perspectives // American Chemistry Society. Polymer Preprints. – 2000. – Vol. 41(1). – P. 1054–1055.
40. *Briskman V.A., Kostarev K.G.* Gel Formation under Microgravity Conditions // in: Polymer Research in Microravity: Polymerization and Processing./Ed.: J.Pojman&J.Downey. ACS Symposium series, № 793, 2001, American Chemistry Society, Washington, DC, P.97–110.
41. *Брискман В.А., Костарев К.Г., Любимова Т.П., Левтов В.Л., Романов В.В.* Полимеризация в условиях микрогравитации: результаты и перспективы // Космические исследования. – 2001. – Т. 39. – № 4. – С. 361–369.
42. *Briskman V.A., Kondyurin A.V., Kostarev K.G., Leontyev V.L., Levkovich M., Mashinsky A.L., Nechitailo G.S., Yudina T.M.* Polymerization in microgravity as a new process in space technology // Acta Astronautica. – 2001. – Vol. 48. – № 2–3. – P. 169–180.
43. *Иванов В.В., Смирнов Б.З.* Кинетика радикальной фотополимеризации в оптически плотных слоях в отсутствие массопереноса // Высокомолекулярные соединения, Краткие сообщения. – 1991. – Т. 33. – № 11. – С. 807–810.
44. *Костарев К.Г., Свистков А.Л., Шмыров А.В.* Формирование неоднородностей полиакриламидного геля при фронтальной полимеризации // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 1074–1080.
45. *Костарев К.Г., Юдина Т.М., Лысенко С.Н.* Визуализация фронтальной полимеризации полиакриламидных гелей // Высокомолекулярные соединения, Серия Б. – 1998. – Т. 40. – № 11. – С. 1896–1901.
46. *Belk M., Kostarev K., Volpert V., Yudina T.* Frontal Photopolymerization with Convection // J.Phys. Chem. B. – 2003. – Vol. 107. – P. 10292–10298.
47. *Kondyurin A., Lauke B., Kondyurina I., Orba E.* Creation of biological module for self-regulating ecological system by the way of polymerization of composite materials in free space // Advances in Space Research. – 2004. – Vol. 34. – №. 7 (SPEC. ISS.) – P. 1585–1591. – DOI 10.1016/j.asr.2004.01.019.
48. *Ghidini T., Grasso M., Gumpinger J., Makaya A., Colosimo B.M.* Additive manufacturing in the new space economy: Current achievements and future perspectives // Progress in Aerospace Sciences. – 2023. – Vol. 142. – P. 100959 – DOI 10.1016/j.paerosci.2023.100959.
49. *Kondyurin A., Mesyats G., Klyachkin Yu.* Creation of high size space station by polymerization of composite materials in free space // Plasticheskie Massy. Vol. 8. P. 25.
50. *Kondyurin A., Kostarev K., Bagara M.* Polymerization processes of epoxy plastic in simulated free space conditions // Acta Astronautica. – 2001. – Vol. 48. – № 2–3. – P.109–113.
51. *Kondyurin A.* Design and Fabrication of Large Polymer Constructions in Space. Elsevier, 2023. 618 p (ISBN: 978–0–12–816803–5)
52. *Kondyurin A.V., Komar L.A., Svistkov A.L.* Modelling of curing of composite materials for the inflatable structure of a lunar space base // J. Compos. Mech. Design. – 2009. – Vol. 15 (4). – P.512–526.

POLYMERIZATION IN SPACE. PERMIAN PERIOD

Lyubimova T.P., Kostarev K.G., Denisova M.O.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Lyubimova T.P., Kostarev K.G., Denisova M.O. Polymerization in space. Permian period // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – No 4. – P. 61–81. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.5>

A brief review of experimental and theoretical studies carried out at the institutes of the Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and devoted to the study of gravity-sensitive mechanisms of the polymerization process is presented. Based on the results of the research, the «Gel-1» space experiment (orbital station «Mir» 1992) was prepared and conducted. Using the data of the experiment, recommendations were developed for obtaining highly homogeneous

polymer materials and polymers with a given distribution of physical and chemical properties, including in-ground conditions. Some of the works started back in the 1990s are successfully continued up to the present time. These are mainly studies of the peculiarities of composite materials curing in the conditions of open space as one of the most promising directions of creating large-size objects near the Earth and on the Moon surface.

Keywords: polymerization, gravity-sensitive mechanisms, space experiment, polymers with homogeneous properties distribution.

Сведения об авторах:

Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией вычислительной гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013 Россия, г. Пермь ул. Академика Королева 1, e-mail: lubimova@icmm.ru

Костарев Константин Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: Kostarev@icmm.ru

Денисова Мария Олеговна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: mod@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 12.11.2024 г.

ПОРТРЕТ УЧЕНОГО



КУЗНЕЦОВ ГЕННАДИЙ БОРИСОВИЧ: УЧИТЕЛЬ, НАСТАВНИК, КОЛЛЕГА

А.А. Адамов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

И.Н. Шардаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Адамов А.А., Шардаков И.Н. Кузнецов Геннадий Борисович: учитель, наставник, коллега // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 83–88. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.6>

Геннадий Борисович Кузнецов родился 9 февраля 1939 г. в Ленинграде, в семье Кузнецовых, военнослужащего Бориса Васильевича и его супруги Прасковьи Михайловны. Получил высшее образование в Куйбышевском инженерно-строительном институте, который окончил в 1961 году с дипломом инженера-строителя. Свою профессиональную деятельность Геннадий Борисович начал мастером СМУ-5 треста № 14 г. Перми, участвовал в строительстве Пермского политехнического института, а с сентября 1962 г. стал работать на кафедре Строительные конструкции, основания и фундаменты ППИ, сначала ассистентом, а затем старшим преподавателем.

С 1965 г. началось взаимодействие Г.Б. Кузнецова с молодым доктором наук А.А. Поздеевым, который организовывал в ППИ кафедру Динамики и прочности машин – кафедру нового типа, нацеленную на выпуск специалистов, сочетающих глубокие фундаментальные научные знания с навыками решения нестандартных инженерных задач. В 1965 году Геннадий Борисович поступил в аспирантуру к А.А. Поздееву, а весной 1969 защитил кандидатскую диссертацию на тему, посвященную расчету деформационного поведения твердотопливных зарядов ракетных двигателей под действием массовых сил.



*Кузнецов Геннадий Борисович
(09.02.1939 – 16.10.1996)*

На кафедре ДПМ Геннадий Борисович был ассистентом, старшим преподавателем и затем доцентом. В этот период он активно занимался оснащением лаборатории ДПМ испытательными машинами, осваивал методики термомеханических испытаний низко модульных высоконаполненных материалов, обучал студентов основам экспериментальной механики.



*Рис. 1. Первый состав аспирантов каф. ДПМ, г. Пермь, 1966 г.
Слева направо: 1-й ряд – Э.В. Дубровских, А.А. Поздеев, Родионов,
2-й ряд – В.А Шишкин, А.М. Шалавин, Г.Б. Кузнецов, В.А Лалетин, Г.Л. Колмогоров*



*Рис. 2. Старший преподаватель Г.Б. Кузнецов и студенты гр. ДПМ-66-2
В. Матвеевко, В. Аликин, А. Шибанов, П. Трусов на лабораторном занятии у испытательной
машины FM-500 (1967 г.)*

В это время на кафедре ДПМ, благодаря организаторскому таланту, личному обаянию и динамичному образу жизни А.А. Поздеева, сформировался большой творческий коллектив аспирантов, молодых преподавателей и студентов. Ежедневно проводился научный семинар,

работали исследовательские группы по нескольким научным направлениям, было налажено взаимодействие с оборонными предприятиями Перми и отраслевыми НИИ. Геннадий Борисович был одним из центров притяжения этого сообщества, он вел работу по исследованию механи-

ческих свойств полимерных материалов, служащих основой твердого топлива для ракетных двигателей. Эти работы положили начало долгосрочному взаимодействию кафедры с заводом им. Кирова и НИИ Полимерных материалов в Перми.

Вокруг А.А. Поздеева сформировалась команда ученых, успешно работающих в различных направлениях механики, которая инициировала создание в Перми одного из первых академических учреждений – Отдела физики полимеров Уральского научного центра АН СССР. Г.Б. Кузнецов был одним из активных участников инициативной группы, которая формулировала основные направления деятельности создаваемого академического учреждения, решала

вопросы его организации и определяла перспективы развития. В 1971 году Отдел начал свою работу, а Геннадий Борисович возглавил лабораторию №1 «Физических свойств полимеров» – одну из четырех лабораторий первого состава. Геннадий Борисович организовал эту лабораторию «с нуля»: определял темы работ, занимался пополнением парка испытательного оборудования, набирал и воспитывал квалифицированных сотрудников, налаживал тесное сотрудничество с несколькими промышленными предприятиями Перми.

В 1976 году в подразделении работало 34 сотрудника, объединенных в группы от 2 до 5 человек. В лаборатории разрабатывались методики механических испытаний различных конструкционных



*Рис. 3. Сотрудники лаборатории № 1 и патентно-информационного отдела
ОФП УНЦ АН СССР (1975 г.)*

*Слева направо: 1-й ряд – Л. Кожевникова, Т. Кошкина, Н. Кузнецова, Г.Б. Кузнецов, Т. Хазова,
О. Лебедева;*

2-й ряд – И. Косиненко, В. Ковров, Е. Кароид, В. Золотухин, В. Лободов;

3-й ряд – А. Дегтярев, В. Попов, А. Роговой, В. Булавин, В. Матвеевко

материалов; проектировались и изготавливались установки для выполнения обширных экспериментальных программ и разнообразная оснастка. Результаты исследований лаборатории, возглавляемой Геннадием Борисовичем, стали значительным вкладом в развитие средств экспериментальной механики. Был установлен ряд фундаментальных результатов, касающихся термомеханического поведения наполненных эластомеров при статических и динамических нагрузках. Эти результаты были использованы при разработке и создании новых ракетных двигателей на твердом топливе. В лаборатории отрабатывались новые на тот момент способы регистрации экспериментальных данных с помощью компьютерной техники, осваивались современные методы численного моделирования в задачах механики деформируемого твердого тела.

В 1992 году Г.Б. Кузнецов стал доктором технических наук, успешно защитив диссертацию по численно-экспериментальному исследованию термовязкоупругого поведения зарядов ракетных двигателей на твердом топливе.

Профессор И.Н. Шардаков, один из первых студентов, прошедших школу Г.Б. Кузнецова, вспоминает: «Вокруг Геннадия Борисовича всегда формировался молодежный коллектив, объединенный научными задачами. Процесс решения задач и обсуждения результатов пронизывал, казалось, всю нашу жизнь. И даже когда мы собирались за праздничным столом, жаркие научные дискуссии продолжались. Поразительно, что Геннадий Борисович доверял нам, студентам, выполнение ответственных и важных прикладных задач. Среди таких работ была алгоритмизация вычислений для определения напряженно-деформированного состояния в твердом топливе при различных вариантах его использования.

Полученные результаты в виде отчетных материалов отправлялись на предприятие заказчику и тут же использовались в конкретных разработках. Вдохновленные важностью поставленных нам Геннадием Борисовичем задач и предоставленной свободой выбора методов их решения, мы стали активно осваивать и продвигать метод конечных элементов, который только начинал внедряться в практику решения задач математической физики».

Многие ведущие пермские ученые-механики начинали свой научный путь под крылом Г.Б. Кузнецова. Среди них академик РАН В.П. Матвеев, профессора А.А. Роговой, И.Н. Шардаков, А.А. Адамов, Н.А. Шевелев и другие. По их воспоминаниям, основная особенность Геннадия Борисовича как руководителя состояла в том, что он доверял молодежи, «не бил по рукам», но всегда добивался того, чего хотел. Профессор А.А. Адамов вспоминает: «Геннадий Борисович постоянно заботился о научном и карьерном росте своих сотрудников, доверял самостоятельное выполнение ответственных работ и заданий своим молодым ученикам, не препятствовал многим уже «оперившимся» сотрудникам переходить в другие лаборатории и организации. Он умело, с юмором сочувствовал и поддерживал своих товарищей, называл соратников «кружком умелые руки». Запомнились его присказки: «Отрицательный результат – это тоже результат», «Хорошая мысль приходит опосля», которые смягчали неожиданные рабочие ситуации. Те же черты отмечает профессор А.И. Дегтярев: «Геннадий Борисович руководил с легким ироничным юмором, никогда не повышал голоса, не унижал людей. Ему не была присуща мелочная опека, стремление управлять и давить. За все годы я не припоминаю ни одного громкого конфликта в коллективе, хотя коллектив, сформированный из очень

молодых людей, проявлял себя не всегда разумно. Мне всегда казалось, что в коллективе Геннадий Борисович чувствовал себя скорее не научным руководителем, а педагогом. При многообразной деятельности лаборатории он постоянно следил за профессиональным ростом подчиненных. Без мелочной опеки он добился, что почти десять сотрудников его лаборатории защитили диссертационные работы». Коллеги отмечают значительный вклад Г.Б. Кузнецова в формирование контактов пермской школы механики с признанными российскими научными центрами. Геннадий Борисович многое сделал для установления творческого сотрудничества с московской школой механиков, возглавляемой чл.-корр. АН СССР А.А. Ильюшиным. По вопросам описания вязкоупругих свойств наполненных эластомеров Геннадий Борисович сотрудничал с профессором М.А. Колтуновым, одним из ведущих ученых школы А.А. Ильюшина. С подачи Геннадия Борисовича многие пермяки прошли обучение в аспирантуре у известных московских профессоров. В диссертационном совете Московского института электронного машиностроения, возглавляемого М.А. Колтуновым, защитили кандидатские и докторские диссертации по механике деформируемого твердого тела не менее десятка пермских ученых. Впоследствии именно они стали локомотивом успеха пермской школы механики деформируемого твердого тела на российском и международном уровне.

Представители московской школы механики стали постоянными участниками пермских научных форумов. Вот только несколько имен известных московских профессоров, тесно сотрудничавших с пермяками: Трояновский И.Е., Кравчук А.С., Моргунов Б.И., Победря Б.Е., Москвитин В.В., Ломакин В.А. и др. Совместные работы Г.Б. Кузнецова с

коллегами из Ижевска, Киева, Ростова-на-Дону, Ленинграда существенно расширили географию научных связей пермской школы механики и способствовали ее широкому признанию.

Геннадий Борисович не утратил интереса и к той области знаний, с которой он начинал свой трудовой путь – строительной науке. В 1992 г. он возглавил кафедру «Основания, фундаменты и мосты» Пермского государственного технического университета. Он преподавал дисциплины «Проектирование автодорожных мостов и труб», «Теория упругости», опубликовал два учебных пособия, вел научные исследования, предложил ряд изобретений по строительной тематике,

В последние годы жизни Г.Б. Кузнецов тяжело болел, но продолжал работать. Геннадий Борисович прожил плодотворную и насыщенную жизнь, в результате которой он сделал значительный вклад в успешное становление пермской школы механики деформируемого твердого тела и открыл дорогу в науку многим молодым людям.

Авторы выражают искреннюю благодарность И.О. Глот за активное участие в подготовке статьи.

Список основных публикаций Кузнецова Г.Б.

1. *Кожевникова Л.Л., Кузнецов Г.Б., Матвеев В.П., Шардаков И.Н.* Аналитическое исследование упругого равновесия полой сферы, жестко закрепленной по внешнему контуру // Проблемы прочности, 1974. – № 9. – С. 20-23.
2. *Адамов А.А., Кожевникова Л.Л., Кузнецов Г.Б., Матвеев В.П.* Метод конечных элементов в задачах линейной термовязкоупругости // В сб.: Напряженно-деформированное состояние конструкций из упругих и вязкоупругих материалов. Свердловск, 1977. – С. 25-30.
3. *Адамов А.А., Кузнецов Г.Б.* К методике описания реологических процессов при конечных деформациях теорией наследственности // В сб.: Прикладные задачи механики полимеров и систем. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1977. – С. 11-20.
4. *Колтунов М.А., Кузнецов Г.Б., Матвеев В.П., Трояновский И.Е., Шардаков И.Н.* Определение оптимальной геометрии осесимметричной составной конструкции // В сб.: Нелинейные задачи строительной механики. Оптимизация конструкций. – Киев, 1978. – С. 77-79.
5. *Кузнецов Г.Б.* Упругость, вязкоупругость и длительная прочность цилиндрических и сферических тел. – М.: Наука, 1979. – 112 с.
6. *Кожевникова Л.Л., Кузнецов Г.Б., Роговой А.А.* Равновесие тел вращения под действием массовых сил. – М.: Наука, 1983. – 102 с.
7. *Бартоломей А.А., Кузнецов Г.Б.* Прикладная теория ползучести грунтов: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 1994. – 67 с.
8. *Бартоломей А.А., Кузнецов Г.Б.* Прикладная теория ползучести и длительной прочности грунтов: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 1996. – 107 с.

Сведения об авторах

Адамов Анатолий Арсангалеевич, профессор, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМССУрО РАН»), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1; e-mail: adamov@icmm.ru

Шардаков Игорь Николаевич, профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: shardakov@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 17.09.2024 г.

ИЗ ИСТОРИИ РОДНОГО КРАЯ



Сторожевая башня (Архитектурно-этнографический музей «Хохловка»)

ЭКСПЕДИЦИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ И ФИКСАЦИИ ОБЪЕКТОВ НЕМАТЕРИАЛЬНОГО ЭТНОКУЛЬТУРНОГО ДОСТОЯНИЯ РОССИИ В 2023 ГОДУ*

Д.И. Вайман, *Институт гуманитарных исследований УрО РАН*

Ю.С. Чернышева, *Институт гуманитарных исследований УрО РАН*

Для цитирования:

Вайман Д.И., Чернышева Ю.С. Экспедиции по выявлению и фиксации объектов нематериального этнокультурного достояния народов России в 2023 году // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 90–100. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.7>

В статье рассматриваются ключевые вопросы работы с объектами нематериального этнокультурного достояния народов России, связанные как с выявлением, так и с представлением данных, полученных в ходе экспедиционных исследований в Удмуртской Республике, Кировской, Мурманской, Оренбургской областях, Забайкальском крае. Освещается проблематика полевого сбора материала, принципов его хранения и последующего использования. Обозначены некоторые особенности экспедиционной работы: учет календарной приуроченности и событийности, сезонности; технические сложности съемки объектов, вызванные как особенностями культурных явлений, так и внешними факторами; уместность использования реконструкционной и постановочной съемки; особенности, связанные с выходом за тематику экспедиций и другие.

Ключевые слова: нематериальное этнокультурное достояние, нематериальное культурное наследие народов России.

Введение

Работа с нематериальным этнокультурным достоянием (НЭД) народов России велась в стране не одно десятилетие, но особую актуальность и толчок к развитию получила за последние несколько лет в

связи с принятием ряда законодательных актов федерального уровня [9, 12, 13]. Так, в 2022 году была начата работа цикла фольклорно-этнографических экспедиций в регионах страны по изучению НЭД народов России. По результатам экспедицион-

* Исследование выполнено в рамках Программы научных исследований этнокультурного многообразия российского общества и направлено на укрепление российской идентичности, 2023-2025 гг. (руководитель академик РАН В. А. Тишков) в рамках проекта «Нематериальное этнокультурное достояние народов Российской Федерации как ресурс сохранения многообразия и формирования российской идентичности». №123101600337-3.

ных исследований были подготовлены и внесены в Федеральный реестр объектов нематериального культурного наследия [11] около 50 объектов*.

Подготовка объектов к внесению в Реестр ставит перед исследователями несколько задач. Прежде всего, это методические вопросы, связанные с фиксацией и изучением объектов НЭД. Для размещения готового объекта в Реестре требуется научный паспорт, а также фото-, видео- и аудиоматериалы, иллюстрирующие данный объект. Перед исследователями стоит задача не только зафиксировать то или иное культурное явление и подготовить его описание, но и подготовить соответствующее аудиовизуальное сопровождение, позволяющее представить объект во всей его полноте. В настоящей статье на ряде примеров будут обозначены некоторые особенности экспедиционной работы: организация работы, фото- и видеофиксация, а также особенности презентации объектов.

Прежде чем перейти к проблематике работы, обозначим основные итоги фольклорно-этнографических экспедиций, проведенных сотрудниками Института гуманитарных исследований УрО РАН (г. Пермь) в 2023 году при поддержке Министерства культуры Российской Федерации совместно с Государственным Российским Домом народного творчества им. В.Д. Поленова, а также АНО «Содействие развитию культуры и массовых коммуникаций «Культурный регион» (г. Ступино, Московская область).

Институт гуманитарных исследований УрО РАН был участником данного проекта в 2022 году и провел полевые исследования в 6 регионах России, в 2023 году – еще в 5 регионах: Удмуртской Республике, Кировской, Мурманской, Орен-

бургской областях, Забайкальском крае [10]. В полевых исследованиях принимали участие А.В. Черных, доктор исторических наук, член-корреспондент РАН (руководитель экспедиций), Д.И. Вайман, кандидат исторических наук, А.В. Вострокнутов, кандидат исторических наук, М.С. Каменских, кандидат исторических наук, В.В. Никонов, Ю.С. Чернышева, М.В. Крысова – сотрудники Института гуманитарных исследований УрО РАН.

Организаторами и участниками со стороны регионов выступили: В.Г. Шалавина, О.Л. Пислегова, Е.В. Байкова – сотрудники АУК Удмуртской Республики «Республиканский дом народного творчества», О.В. Ходырева – сотрудник Кировского ОГАУК «Областной Дом народного творчества», Е.Г. Ерохина, А.Н. Зверева, А.В. Филатова – сотрудники ГУК «Учебно-методический центр культуры и народного творчества Забайкальского края», М.С. Викторова, Е.В. Крюкова, Е.В. Герасимова – сотрудники ГОАУК «Мурманский областной Дворец культуры и народного творчества им. С.М. Кирова», О.В. Савенко, В.Ю. Белецкий, О.В. Качаева – сотрудники ГАУК «Региональный центр развития культуры Оренбургской области».

Итоги экспедиционных исследований

В 2023 году цикл фольклорно-этнографических экспедиций начался с изучения нематериального этнокультурного достояния (НЭД) Удмуртской Республики. Полевые исследования проходили с 3 по 10 июня в Сарапульском (с. Юрино), Каракулинском (с. Арзамасцево), Красногорском (с. Красногорское), Кезском (с. Степаненки, с. Петроконово, с. Тимены, с. Кулига) районах. По итогам работы экспедиции были подготовлены материа-

* Под объектом понимается целостный структурно-однородный фрагмент традиционной народной культуры, зафиксированный в конкретной локальной традиции в определенный период времени – устное творчество, исполнительское искусство, обряды и обычаи, технологии и навыки и пр. [10, 11].

лы по 4 объектам НЭД:

- Технология плетения из сосновой щепы (дранки);
- Бытование традиционного костюма у русских старообрядцев Верхокамья;
- Традиционная кухня у старообрядцев Верхокамья;
- Празднование Троицы в с. Юрино Сарапульского района.

Выявленные объекты подготовлены для размещения в федеральном реестре: произведены аудио-, фото- и видеофиксация объекта как явления культуры, а также записаны интервью с местными жителями, подготовлены научные паспорта объекта, отобраны фотографии, видео- и аудиозаписи. Проведена работа в фондах музеев, беседы с работниками местных учреждений культуры по работе с сохранением и актуализацией НЭД. Кроме того, в Каракулинском районе изучались особенности материальной и духовной культуры переселенцев Тамбовской области, компактно проживающих в с. Арзамасцево. Эта работа продолжает многолетние исследования Института гуманитарных исследований в области изучения переселенческой и материнской традиций дисперсных групп русского народа.

С 15 по 22 июня экспедиционные исследования прошли в Кировской области в Котельничском (пос. Ленинская Искра, д. Боровка), Белохолуницком (пос. Дубровка), Афанасьевском (пгт. Афанасьев, д. Ромаши, д. Мироново, д. Илюши, д. Пашино, д. Московская) районах. В результате были подготовлены 3 объекта НЭД:

- Игра в «лодыжки» в д. Московская Афанасьевского района Кировской области;
- Подблюдные святочные гадания «Илею» Котельничского района Кировской области;
- Троицкие хороводы Афанасьев-

ского района Кировской области.

Помимо работы с объектами НЭД были собраны данные по материальной и духовной культуре коми-пермяков Афанасьевского района, изучались этническая идентичность и особенности языка. В сёлах и деревнях Белохолуницкого и Афанасьевского районов изучены песенные и хороводные традиции, приуроченные к Троицким гуляниям. Бытующие здесь песни сохраняют местные жители (д. Илюши) и фольклорные ансамбли – «Старинушка» (пос. Дубровка), «Калинушка» (д. Ромаши), «Родники» (пос. Афанасьев), «Ниримдор» (д. Московская). Репертуар и певческая манера ансамблей опираются на подлинную народную традицию северо-восточных районов Кировской области.

Экспедиция в Забайкальском крае проходила с 3 по 10 июня. Полевые исследования прошли в Агинском (с. Челутай) и Красночико́йском (с. Архангельское, с. Красный Чикой, с. Барахоево) районах. По итогам работы были подготовлены 4 объекта НЭД:

- Традиционная кухня бурят Агинского района Забайкальского края;
- Традиционный женский костюм семейских старообрядцев Забайкалья;
- Традиционные технологии сбора и переработки кедровой шишки у семейских старообрядцев Забайкалья;
- Традиционная кухня семейских старообрядцев Забайкалья.

Работа в Забайкалье включала изучение этнической идентичности и самосознания, особенностей языка и культуры бурят Агинского района, что дополнило многолетние исследования сотрудников института в области этнической истории и национальной политики.

С 4 по 10 сентября полевые исследования прошли в Мурманской области в г. Мурманск и Ловозерском (с. Ловозеро), Терском (пос. Умба, с. Варзуга), Кольском

(пос. Лопарская) районах. В результате работы были подготовлены 3 объекта НЭД:

- Приготовление обрядового печения козули у поморов Терского берега;
- Техники и технологии обработки кости у кольских саамов;
- Традиционная кухня кольских саамов.

В Мурманской области также изучалась песенная традиция поморов Терского берега, были записаны исполнения песен ансамблем «Беломорье» (г. Мурманск) и народным коллективом «Фольклорный хор» (пос. Умба), носителями фольклорной традиции. В рамках изучения сотрудниками института вопросов этнической идентичности и национальной политики состоялись интервью с представителями коренного малочисленного народа России, проживающими на Кольском полуострове – саамами.

Завершила цикл экспедиционных исследований поездка в Оренбургскую область, которая была проведена с 25 сентября по 2 октября сотрудниками Института гуманитарных исследований совместно с руководителем Центра русского фольклора ГРДНТ им. В.Д. Поленова Д.В. Морозовым. Исследования проводились в Саракташском (с. Федоровка Первая, с. Черкассы, с. Николаевка, с. Сунарчи), Кувандыкском (пос. Карагай-Покровка), Переволоцком (с. Кубанка, с. Степановка), Александровском (с. Ждановка), Илекском (с. Затонное, с. Кардаилово), Шарлыкском (с. Ратчино, с. Путятино) и Тюльганском (с. Городки) районах. По итогам работы были подготовлены 4 объекта НЭД:

- Песенные традиции казаков Оренбуржья;
- Технология изготовления черной жвачки «һағыз» у башкир Оренбургской области;

• Традиционная кухня немцев-меннонитов Оренбуржья;

- Технология изготовления и особенного бытования шпрухов* немцев-меннонитов Оренбуржья.

Особенности экспедиционной работы

Экспедиционная работа по фиксации объектов НЭД безусловно имеет свою региональную специфику, выраженную в изучении местных локальных и самобытных культурных феноменов [8]. Одной из важных составляющих экспедиционной работы, направленной на фиксацию объектов НЭД разных категорий, является учет некоторых особенностей, связанных с тем или иным явлением культуры: приуроченность работы к существующему и воспроизводимому событийному ряду, этические и правовые нормы фиксации обрядовых или иных действий, вступающих в противоречие с законодательными нормами, научная погруженность в тему и ряд иных аспектов.

Помимо документирования объектов нематериального этнокультурного достояния, относящихся как к уникальным, так и к типичным явлениям традиционной культуры, мы можем отметить некоторые аспекты, затрагивающие непосредственно полевую работу. Очевидно, что за каждой фиксацией объекта НЭД стоит серьезная научная работа, связанная не только с самим предметным полем объекта, но и с осмыслением куда более широкого этнокультурного контекста, в рамках которого тот или иной объект описывается [7]. Например, во время экспедиционной работы по фиксации объектов НЭД проводились исследования традиционной культуры русского населения, проживающего в иноэтничном окружении, что приближало нас к рассмотрению русской культуры как феномена культуры остров-

* Шпрух – короткое изречение назидательного характера, чаще библейская цитата, философское высказывание или благопожелание

ного типа. Рассмотрение разных кейсов: русского населения в национальных республиках Урала-Поволжья в условиях этнокультурного окружения, коми-пермяков Афанасьевского района Кировской области, немецких компактных поселений в Оренбургской области – является чрезвычайно важным в понимании конкретного этнокультурного ландшафта, в осмыслении механизмов воспроизводства и трансляции культурных традиций, механизмов межэтнического взаимодействия, а также вопросов фиксации этнокультурного достояния и его дальнейшей репрезентации.

Еще один важный аспект связан с осмыслением этнокультурного достояния в более широком географическом ключе, нежели заявлено в тематике самого объекта. Во время съемки объектов зачастую мы сталкиваемся с этой необходимостью. Например, объект «Бытование традиционного костюма у русских старообрядцев Верхокамья» не может быть привязан к одному региону страны, поскольку понятие «Верхокамье» объединяет районы двух регионов – Сивинский, Верещагинский районы в Пермском крае и Кезский район Удмуртской Республики. Таким образом, традиция рассматривается не в рамках какого-то района, а в целом на исторически сложившемся культурном ареале. Отсюда возникает и сложность фиксации объекта, требующая работы с одним и тем же культурным явлением в разных административно-территориальных единицах. Последнее, в свою очередь, влияет на организацию экспедиционной работы в целом. Потребность охватить несколько населенных пунктов (и даже регионов) для всестороннего изучения и фиксации объекта НЭД – одна из особенностей полевой работы.

Еще одна особенность заключается в соотношении календарной приуроченности того или иного явления нематериального этнокультурного достояния с орга-

низацией полевой работы и записи. Практически невозможно всесторонне охватить за один день (или даже несколько) все события того или иного календарного праздника. Как правило, за рамками фиксации остается период, предшествующий празднику, – его подготовка. Например, при съемке праздника Троицы мы можем зафиксировать непосредственно сам праздник, однако весь комплекс обрядово-ритуальных действий, растягивающийся на несколько дней, оказывается за кадром. Однако есть механизмы, помогающие восполнить этот пробел: например, этого можно достичь путем проведения дополнительных съемок и включения в итоговый материал, представленный к публикации, интервью с хранителями традиции. При этом мы должны учитывать, что включение постановочной реконструкционной съемки никак не должно нарушать целостность визуального ряда в представлении традиции.

Кроме того, есть некоторые технические сложности, которые чаще всего следует ожидать при не постановочной съемке. Например, в случае с подготовкой объекта «Празднование Троицы в с. Юрино Сарапульского района» мы столкнулись с такими: порывы ветра (от которых не спасали даже ветрозащитные шумопоглотители на микрофонах), звуки проезжающих машин, параллельно происходящие действия обряда в разных точках села. Еще одна сложность с фиксацией объектов категории обрядово-праздничной культуры – некоторые действия необходимо снять с одного дубля и с разных ракурсов. Таким образом, исследовательской группе следует иметь соответствующее техническое оснащение и подготовку. Хотя сложность съемки с одного дубля присуща также подготовке видеофиксации и объектов других категорий, например, традиционной кухни или декоративно-прикладного творчества.

При записи объектов НЭД, тематически посвященных народным праздникам, перед исследователями стоит сложная задача: определить моменты, которые будут зафиксированы на камеру. Наличие сценария является необходимым в представлении получения конечного продукта. Исследователь должен быть глубоко погружен в материал и понимать, какие этапы и действия являются ключевыми и будут в конечном счете отражены. Опыт проведения полевых съемок показывает, что опираться на сценарий уместно при записи фольклорных традиций, технологий приготовления традиционной кухни, народных художественных промыслов, традиционных ремесел и всех иных навыков, и форм их представления, связанных с укладами жизни. Однако всё может выйти за рамки сценария и происходить иначе, чем было запланировано. В таком случае, руководствуясь стремлением не упустить «нужный кадр», следует сосредоточиться на сплошной фиксации, производя фото или видеосъемку в режиме «нон-стоп». Учет вышеперечисленных факторов позволит существенно улучшить качество съемки и как итог – получить материал, позволяющий не потерять аудио- и визуальных характеристик.

При работе с объектами декоративно-прикладного творчества крайне важно заблаговременно сделать необходимые заготовки, особенно это касается сложных изделий, изготовление которых требует продолжительного времени. Например, при съемках технологий изготовления шпрухов немцев-меннонитов Оренбуржья требовалось не так много времени ждать, пока высохнет акриловая краска. А вот в случае с кардаиловской глиняной игрушкой (этот объект был зафиксирован, но не подготовлен к внесению в каталог) пришлось разбивать технологию на несколько этапов и тщательно продумывать съемочный процесс, поскольку от

сырой глины до готовой расписанной игрушки уходит не один день. При съемках объекта «Технология плетения из соевой щепы (дранки)» мы столкнулись с отсутствием большого количества заготовок. Поскольку плетение из дранки – это зимнее занятие, мастеру пришлось приложить большие усилия, чтобы в летний сезон найти и подготовить для работы необходимые материалы. Еще один пример – подготовка объекта «Традиционные технологии сбора и переработки кедровой шишки у семейских старообрядцев Забайкалья». Кедровый промысел начинается в осенне-зимний период, когда шишки созреют. Чтобы представить процесс сбора и переработки в максимально полном объеме, пришлось прибегнуть к ряду хитростей – использовать прошлогодние запасы шишек, подготовить постановочную съемку некоторых действий – всё для того, чтобы итоговый результат в полной мере отражал данную технологию. В данном случае мы сталкиваемся с тем же ключевыми вопросами реконструкции и постановки, а также сезонности.

Также стоит проговорить некоторые общие вопросы, возникающие при съемке традиционной кухни, технологий ее приготовления. В первую очередь следует обозначить наличие некоторых технических сложностей, сопряженных с зонной съемки, которая, как правило, ограничена маленьким пространством кухни или же иным пространством, которое по своим характеристикам не отвечает заявленным требованиям визуального ряда и содержательно не воспроизводит аутентичный колорит представленной культуры. Например, фиксация традиционных технологий приготовления пищи немыслима без использования в кадре русской печи. Среди принципов работы по фиксации технологий приготовления пищи стоит обозначить съемку с «перво-

го дубля», так как многие процессы просто технически сложно воспроизвести заново. Фиксация всех этапов становится не просто очевидным, но обязательным критерием для документирования объекта. При съемке традиционной кухни важным является отсутствие в кадре визуального шума – пластиковой посуды и иных посторонних предметов, не отвечающих тематике съемки. Использование аутентичных атрибутов, фонов приближает нас к воссозданию аутентичной картинке, помогает сформировать целостность образа, некую эстетику в восприятии традиции, транслируемую посредством визуальных источников. Зачастую такой подход можно охарактеризовать как некую стилизацию. Однако нам ближе точка зрения, согласно которой формируется некая эстетика презентации традиционной культуры, целостность образа, ее подлинность.

Безусловно, важность сезонности для традиционной кухни также не теряет своей актуальности, так как многие кулинарные и технологические процессы сопряжены с конкретным временем года. Например, у саамов Кольского полуострова приготовление строганины приходится на осенний период, когда начинается период закалывания оленей. Сезонность традиционной системы питания напрямую связана с народным календарем и хозяйственной деятельностью. Однако не смотря на вышеобозначенные факторы, возможностей для съемки подобных объектов без четкой привязки к конкретным датам гораздо больше, нежели объектов празднично-обрядовой культуры.

В работе по фиксации песенного творчества также следует отметить определенную специфику, сопряженную, прежде всего, с погруженностью исследователя в поле этномузыкологии. Безусловно, в обозначенном поле, как и с другими объектами, чрезвычайно важно ориентироваться

в фиксируемой/изучаемой традиции, а в данном случае – в фольклорной, знать местный репертуар. При записи фольклорных коллективов с технической точки зрения все процессы имеют простой алгоритм действий: фиксация происходит посредством записи каждого участника или группы фольклорного коллектива одновременно во время коллективного исполнения. При сопровождении визуального событийного ряда, существуют некоторые сложности с фиксацией аудио, однако этот момент легко корректируется посредством воспроизводства записи в отсутствие динамичного передвижения участниц/участников. Главные вопросы, которые неизбежно встают перед собирателем – представить максимально широко видовое и жанровое разнообразие местного фольклорного наследия. Может быть, следует обозначить, какую роль при этом играют сегодня фольклорные коллективы, аутентичны ли они, какого периода фольклорную традицию они воспроизводят. При этом необходимо обозначить бытование изучаемого фольклора, присутствующего местной традицией.

Исследователи неоднократно отмечали, что при фиксации фольклорного наследия появляется множество вопросов касательно принципов подхода к материалу. Сложность работы с данным видом НЭД сопряжена с глубоким пониманием сути, как «исполнители пользуются разными вокальными приемами: сброс дыхания в конце фраз, восходящие и нисходящие движения к звуку и от звука, мягкое глоссандирование между слогами и в распевах слогов, в том числе с выделением проходящих звуков» [6; 21-24]. Пожалуй, это лишь небольшой круг вопросов, лежащих на поверхности. При записи фольклорных коллективов казаков Оренбургской области, в условиях исторически сложившегося фольклорного двуязычия, звучали песни как на русском, так и на

украинском языке, что безусловно отражает некоторую специфику данной песенной традиции. Среди главных задач экспедиции были: отразить фольклорные музыкальные традиции региона, зафиксировать наиболее аутентичные тексты, манеру исполнения, определить место аутентичного материала в репертуаре местных коллективов. Кроме того, определить состояние фольклорной традиции в регионе в целом.

Выводы

Обращаясь к опыту последних двух лет работы в рамках экспедиции по выявлению и фиксации объектов нематериального этнокультурного достояния народов России в 2022-2023 гг., стоит отметить, что экспедиционная работа в каждом из регионов имела ряд особенностей. Зачастую эти особенности были продиктованы не столько культурными, историческими, религиозными или географическими факторами фиксируемого наследия, хотя они, безусловно, являются одними из ключевых в описании специфики того или иного наследия, сколько некоторыми универсалиями, касающимися общего осмысления работы, принципов и подходов к обработке материалов, а также технической стороны создания визуальной составляющей конечного продукта.

Работа с объектами, в независимости от выбранной темы, предполагает приуроченность к тому или иному времени года, ориентацию на событийность. Некоторые технологические процессы растягиваются на длительное время, что может быть связано с длительными съемками. При подготовке объекта для публикации в Реестре объектов нематериального этнокультурного достояния визуальный контент является важной составляющей в репрезентации материалов. При оформлении визуальной составляю-

щей объекта, необходимо учитывать специфику, связанную не только с его пространственно-временными и этнокультурными характеристиками, но и со структурной композицией кадра. Фотографирование и видеосъемка объекта могут быть репортажными, постановочными или полупостановочными, когда отдельно воспроизводятся только некоторые сюжеты. При сплошной событийной фиксации или реконструкционной съемке мы должны исходить из принципов воссоздания максимально «аутентичного» кадра, максимально приближенного к духу времени. Например, во время съемки традиционного костюма, технологии его изготовления, в кадре не должно присутствовать «визуального шума», выраженного в виде современных ювелирных украшений, часов и телефонов. Аналогичный пример можно привести касательно съемки аутентичных фольклорных коллективов, которые зачастую используют современные стилизованные его формы, не отражающие локальной и этнической самобытности. В таком случае, в отсутствие сохранившихся традиционных элементов костюма, мы рекомендовали бы отказаться от сценических образов. При наличии комплекса традиционного костюма его использование только подчеркнет самобытность представленной традиции и поможет оформить целостный образ, однако не стоит забывать, что представление фольклорного наследия в данном случае – первичная задача.

Итогом экспедиций стали материалы, подготовленные к публикации в федеральном реестре объектов нематериального этнокультурного достояния, несколько научных публикаций по итогам экспедиций НЭД, а также полевые материалы, хранящиеся в архиве ИГИ УрО РАН [3;4;5].

Проведена работа не только по документированию типичных и уникальных этнокультурных явлений, но и по исследованию явлений традиционной культуры, зачастую выходящих за рамки тематики экспедиций. Затрагивая тематику традиционной системы питания и технологию приготовления, мы рассматриваем кухню в контексте праздников и будней, обрядовой пищи, системы хозяйственных отношений, взаимодействия традиции и новаций, появления этнокультурных явлений и заимствований.

Собранные материалы существенно расширили многолетние исследования сотрудников по данной теме и будут использованы в дальнейшей работе. Таким образом, в рамках проекта фольклорной экспедиции по подготовке объектов нематериального этнокультурного достояния было продолжено этнографическое исследование русской культуры в Республике Удмуртия и Кировской области, коми-пермяцкой культуры в Кировской области. В рамках проекта были продолжены многолетние исследования немецкой культуры

на Южном Урале [1;2]. Также сотрудниками Института гуманитарных исследований были начаты исследования культуры поморов и саамов на Кольском полуострове, результатом которых станет подготовка специалистами института нескольких научных статей [5]. Таким образом, во время экспедиций по выявлению и фиксации объектов нематериального этнокультурного достояния народов России в 2023 г. был собран корпус полевых аудио- и визуальных источников, фольклорных и этнографических записей по традиционной культуре народов России. Хотелось бы отметить, что записи на родном языке, сделанные во время экспедиций, содержат уникальную информацию об обычаях, традициях, использованных технологиях и этических особенностях определенной группы людей. Полученные материалы могут помочь составить полное представление о культуре отдельных сообществ и быть использованы в качестве ценного источника для филологических, лингвистических и диалектологических исследований.

Библиографический список

1. *Вайман Д. И.* Календарные праздники и обряды немцев Урала в конце XIX – начале XXI в. СПб.: Изд-во «Маматов», 2017. – 320 с.
2. *Вайман Д. И.* Шпрухи российских немцев. СПб.: Изд-во «Маматов», 2022 – 312 с.
3. *Вайман Д. И.* Традиционная кухня немцев-меннонитов. Оренбуржья: сохранение, актуализация и популяризация нематериального этнокультурного достояния российских немцев // Славянская традиционная культура и современный мир: фольклор в современном обществе. Казань: ООО «Фолиант», 2023. – С. 153-162.
4. *Вострокнутов А. В.* Традиции плетения из сосновой щепы (дранки) в Красногорском районе Удмуртской Республики: полевые материалы 2023 г. // Труды Камской Археолого-этнографической экспедиции Вып. XXIII. – С. 54-59.
5. *Вострокнутов А. В.* Изучение нематериального этнокультурного достояния Российской Федерации: косторезное ремесло в Мурманской области: полевые материалы 2023 г. // Вестник Музея археологии и этнографии Пермского Предуралья. Вып. XIII. 2023. – С. 53-57.
6. *Черных А.В.* Песенная традиция русских сел Октябрьского района Пермского края в записях конца XX века. СПб.: Изд-во «Маматов», 2021. – 456 с.
7. *Черных А.В.* Нематериальное культурное наследие России: проблемы сохранения и презентации // Культурное наследие: современные интерпретации культурного наследия народов России): Сб. ст. / Под редакцией В.А. Тишкова, С.В. Бааха. Сост. Б.А. Синанов, В.В. Тишков – М.: ИЭА РАН, 2023. – С. 11-30.

8. Черных А.В. Нематериальное этнокультурное достояние народов России: предметное поле и проблемы сохранения и актуализации // Культурное наследие Сибири: изучение, музеефикация, презентация, к 30-летию Сибирского филиала Института Наследия: материалы всероссийской научно-практической конференции, Омск, 17–18 мая 2023 года. – Омск: Институт Наследия, 2023. – С. 131-132.
9. Черных А.В., Каменских М.С. Нематериальное этнокультурное достояние народов России в федеральном и региональном законодательстве: история и основные тенденции (2003-2023) // Вестник российской нации. – 2024. – № 1. – С.23-37.
10. Черных А. В., Чернышева Ю. С. Экспедиции по выявлению и фиксации объектов нематериального этнокультурного достояния народов России в 2022 году // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 4. – С. 41-46
11. Объекты нематериального культурного наследия народов Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusfolknasledie.ru/#/main> (дата обращения: 17.03.2024).
12. Федеральный закон от 20.10.2022 № 402-ФЗ «О нематериальном этнокультурном достоянии Российской Федерации» // Официальное опубликование правовых актов. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210200005> (дата обращения: 17.03.2024)
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.08.2023 № 1277
14. «Об утверждении Положения о федеральном государственном реестре объектов нематериального этнокультурного достояния Российской Федерации» // Официальное опубликование правовых актов. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202308070002?index=3> (дата обращения: 17.03.2024)

**EXPEDITIONS TO IDENTIFY AND RECORD OBJECTS OF
INTANGIBLE ETHNOCULTURAL HERITAGE OF THE PEOPLES OF RUSSIA IN 2023**

Dmitry I. Vaiman, Yulia S. Chernysheva

Institute of Humanitarian Studies UB RAS

For citation:

Dmitry I. Vaiman, Yu. S. Chernysheva Expeditions to identify and record objects of intangible ethnocultural heritage of the peoples of Russia in 2023 // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – No 4. – P. 90–100. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.7>

The article discusses key issues of working with objects of intangible ethnocultural heritage of the peoples of Russia, related to both the identification and presentation of data obtained during expeditionary research in the Udmurt Republic, Kirov, Murmansk, Orenburg regions, and the Trans-Baikal Territory. The problems of field collection of material, principles of its storage and subsequent use are highlighted. Some peculiarities of expedition work are outlined: taking into account calendar and event timing, seasonality; technical difficulties of surveying objects caused by both features of cultural phenomena and external factors; appropriateness of using reconstruction and staged photography; traits related to going beyond the subject matter of expeditions and others.

Keywords: intangible ethnocultural heritage; intangible cultural heritage of the peoples of Russia.

Сведения об авторах:

Вайман Дмитрий Игоревич, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, Институт гуманитарных исследований УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИГИ УрО РАН»), 614900, Пермь, ул. Генкеля, 4; e-mail: dmitrii-vaiman@ya.ru
Чернышева Юлия Сергеевна, научный сотрудник, «ИГИ УрО РАН»; e-mail: yulyachernysheva99@gmail.com

Материал поступил в редакцию: 22.10.2024 г.