

ISSN 2658-705X

# ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

ЯНВАРЬ – МАРТ 1/2023

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА № 1 2023

ISSN 2658-705X



9 772658 705002 >

# ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

№ 1 ЯНВАРЬ – МАРТ 2023

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

**Главный редактор**

академик РАН *В.П. Матвеевко*

**Редакционная коллегия**

канд. экон. наук *А.Г. Андреев*  
академик РАН *А.А. Барях*  
д-р истор. наук *А.М. Белавин*  
академик РАН *Н.В. Зайцева*  
академик РАН *И.Б. Ившина*  
академик РАН *А.А. Иноземцев*  
д-р истор. наук *И.К. Кирьянов*  
чл.-корр. РАН *Л.Ю. Левин*  
чл.-корр. РАН *В.Ю. Мишланов*  
канд. экон. наук *И.П. Огородов*

чл.-корр. РАН *О.А. Плехов*  
д-р техн. наук *И.А. Санфиоров*  
чл.-корр. РАН *В.Н. Стрельников*  
чл.-корр. РАН *М.И. Соколовский*  
д-р физ.-мат. наук *А.А. Ташкинов*  
чл.-корр. РАН *Е.Г. Фурман*  
чл.-корр. РАН *О.В. Хлынова*  
чл.-корр. РАН *А.В. Черных*  
д-р мед. наук *С.В. Гейн*  
чл.-корр. РАН *Т.В. Гаврилова*

**Ответственный секретарь**

канд. техн. наук *В.П. Приходченко*

**Адрес редакции журнала:**

614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13А

тел.: (342) 212-43-75

e-mail: [vestnik@permisc.ru](mailto:vestnik@permisc.ru)

# PERM FEDERAL RESEARCH CENTER JOURNAL

№ 1 JANUARY – MARCH 2023

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

## **Editor-in-Chief**

Academician *V.P. Matveenko*

## **Editorial Board**

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

Academician *A.A. Baryakh*

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

Academician *N.V. Zaytseva*

Academician *I.B. Ivshina*

Academician *A.A. Inozemtsev*

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

RAS corresponding member *L.Yu. Levin*

RAS corresponding member *V.Yu. Mishlanov*

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

RAS corresponding member *O.A. Plekhov*

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

RAS corresponding member *V.N. Strelnikov*

RAS corresponding member *M.I. Sokolovskii*

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

RAS corresponding member *Eu.G. Furman*

RAS corresponding member *O.V. Khlynova*

RAS corresponding member *A.V. Chernykh*

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

RAS corresponding member *T.V. Gavrilova*

## **Executive Editor**

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

## **Editorial office address:**

13A, Lenin St., Perm, 614990, Russia

tel.: (342) 212-43-75

e-mail: [vestnik@perm-sc.ru](mailto:vestnik@perm-sc.ru)

# СОДЕРЖАНИЕ

ЯНВАРЬ – МАРТ 1/2023

---

## **ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

*Вассерман И.Н., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.*

Распространение электрического импульса и возникновение автоколебаний в неоднородном миокарде ..... 6

*Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Кондюрина И.В., Маккензи Д.*

Ковалентная иммобилизация альбумина на поверхности медицинского поливинилхлорида, модифицированного плазменно-иммерсионной ионной имплантацией ..... 17

*Сайдакова Е.В.*

Современное понимание проблемы иммунологического неответа на терапию ВИЧ-инфекции ..... 25

*Новокишнова А.Д., Храмцов П.В., Раев М.Б.*

Применение культур хлореллы обыкновенной в биотехнологии и пищевой промышленности ..... 32

*Трапезникова А.Б., Ярославцев А.Г., Санфиров И.А., Степанов Ю.И., Байбакова Т.В.*

Геофизическое обоснование пород-коллекторов для закачки избыточных рассолов калийного производства ..... 43

*Жданова И.Н., Морозов Н.А.*

Применение левзеи сафлоровидной, эспарцета песчаного и клевера лугового в составе кормовой смеси для крупного рогатого скота ..... 51

## **ЭТЮДЫ О НАУКЕ**

*Файнбург Г.З., Исаевич А.Г.*

Открытие, которое изменило мир (о роли Пермской науки в рождении и применении селвинитовой спелеоклиматотерапии) ..... 59

*Наумкин Д.В., Кадебская О.И.*

К 75-летию Кунгурской лаборатории-стационара Горного института ПФИЦ УрО РАН ..... 67

## **ПОРТРЕТ УЧЕНОГО**

*Барях А.А., Файнбург Г.З.*

А.Е. Красноштейн – ученый и человек ..... 85

*Ткаченко А.Г., Чудинова А.Р.*

Роберт Алексеевич Пшеничнов, вклад в становление академической микробиологической науки в Перми ..... 93

---

# CONTENTS

JANUARY – MARCH 1/2023

---

## **RESEARCH: THEORY AND EXPERIMENT**

- Vasserman I.N., Shardakov I.N., Shestakov A.P.*  
Propagation of electric excitation and the appearance of auto-oscillations in an inhomogeneous myocardium ..... 6
- Chudinov V.S., Shardakov I.N., Kondyurina I.V., McKenzie D.*  
Covalent immobilization of albumin on the surface of medical polyvinyl chloride modified by plasma-immersion ion implantation..... 17
- Saidakova E.V.*  
A contemporary view of immunological non-response to highly active antiretroviral therapy .....25
- Novokshonova A.D., Khramtsov P.V., Rayev M.B.*  
Application of chlorella vulgaris cultures in biotechnology and food industry.....32
- Trapeznikova A.B., Yaroslavtsev A.G., Sanfirov I.A., Stepanov Yu.I., Baibakova T.V.*  
Geophysical substantiation of reservoir rocks for injecting excess brines from potash production.....43
- Zhdanova I.N., Morozov N.A.*  
*Application of safflower, sainfoin and meadow clover in the feed mixture for cattle* .....51

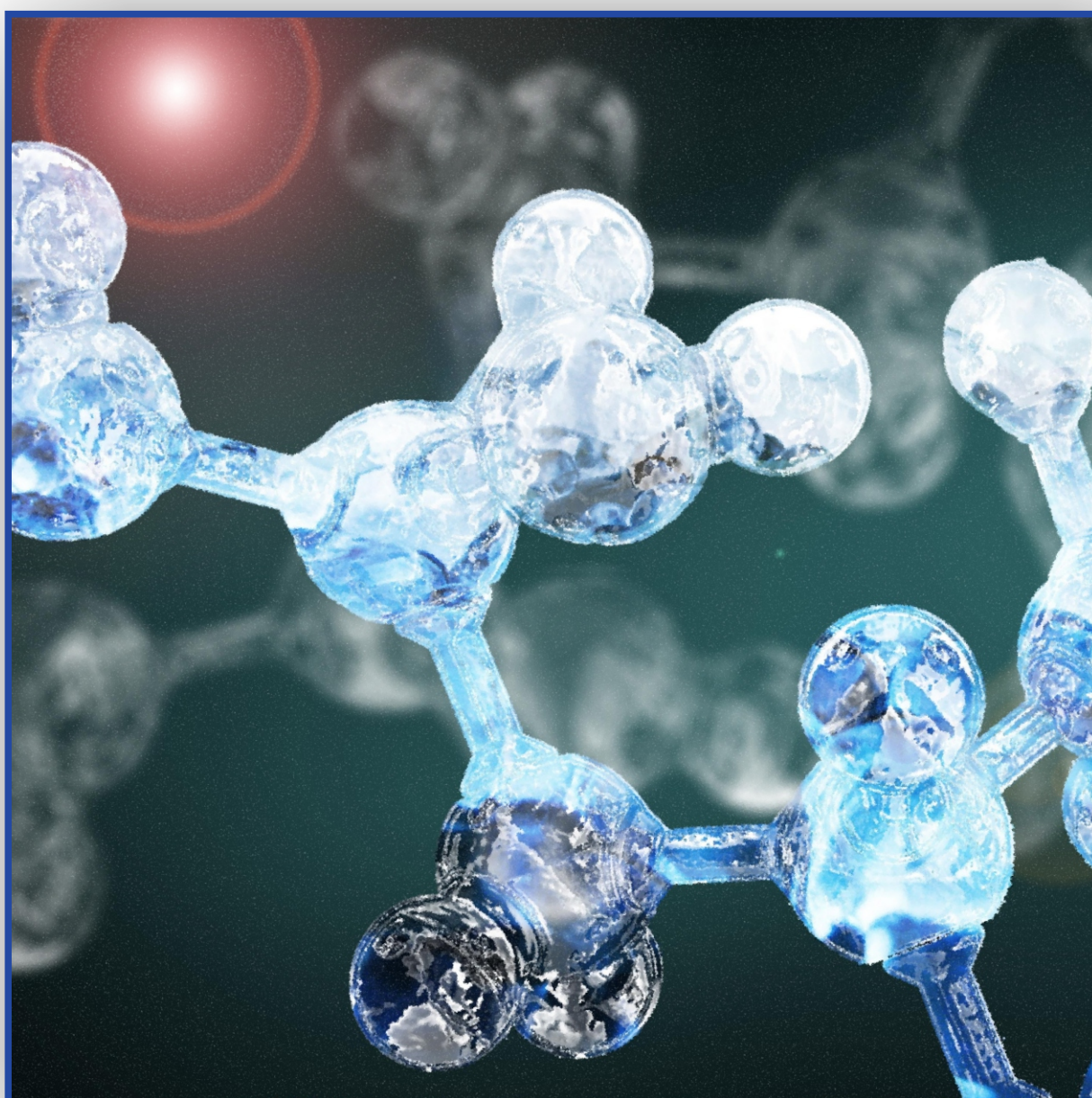
## **STUDIES ABOUT SCIENCE**

- Faynburg G.Z., Isaevich A.G.*  
The discovery that changed the world (about the role of Permian science in the birth and application of silvinitic speleoclimatotherapy) ..... 59
- Naumkin D.V., Kadebskaya O.I.*  
To the 75<sup>th</sup> anniversary of the Kungur laboratory of the Mining Institute UB RAS..... 67

## **PORTRAIT OF THE SCIENTIST**

- Baryakh A.A., Faynburg G.Z.*  
A.E. Krasnoshtein – scientist and person ..... 85
- Tkachenko A.G., Chudinova A.R.*  
Robert A. Pshenichnov, contribution to the formation of academic microbiological science in Perm ..... 93
-

**ИССЛЕДОВАНИЯ:  
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ**



## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА И ВОЗНИКНОВЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ В НЕОДНОРОДНОМ МИОКАРДЕ \*

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

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

А.П. Шестаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

### Для цитирования:

Вассерман И.Н., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Распространение электрического импульса и возникновение автоколебаний в неоднородном миокарде // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 6–16. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.1>

Среди процессов, происходящих в сердечной ткани, ведущую роль играет распространение электрического возбуждения, поскольку именно оно определяет и запускает все другие процессы в миокарде. Одним из опасных нарушений деятельности сердца является возникновение самовоспроизводящихся волновых процессов, не приводящих к сокращению сердца как целого органа. Причиной возникновения таких процессов могут служить как дополнительные источники электрического возбуждения, так и дефекты, имеющиеся в миокарде.

В статье представлены результаты численного моделирования электродинамических процессов в миокарде, позволяющие проанализировать автоколебательные режимы миокарда, а также выявить факторы, способствующие возникновению этих явлений и, наоборот, блокирующие их развитие.

**Ключевые слова:** миокард, томографический образ, метод конечных элементов, проводящая система.

### Введение

Болезни сердца являются одной из основных причин преждевременной смерти, и поэтому работа сердца является одним из наиболее важных направлений исследований в биофизике и биомеханике.

Для сердечной деятельности характерна тесная взаимосвязь электрических, диффузионных, химических, деформационных и гидродинамических процессов.

Среди процессов, происходящих в сердечной ткани, ведущую роль играет распространение электрического возбуждения, поскольку именно оно определяет все другие процессы в миокарде.

Электрическая стимуляция запускает рост концентрации ионов кальция в сердечной клетке, что, в свою очередь, приводит к сокращению сердечной мышцы (электромеханическое сопряжение). Про-

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН (номер темы АААА-А19-19012290100-8).

цесс сокращения миокарда сопровождается большими перемещениями и деформациями, которые оказывают значительное воздействие на процесс электрического возбуждения (механоэлектрическая обратная связь). Это влияние заключается как в изменении проводимости миокарда, так и в возникновении дополнительных трансмембранных токов (активируемые деформацией ионные каналы SAC).

Миокард имеет сложную неоднородную волокнисто-слоистую структуру и обладает ортотропными электрическими и механическими свойствами. Физиологическое возбуждение желудочков сердца происходит посредством проводящей системы, скорость распространения импульса в которой на порядок превосходит таковую в миокарде. Электрическое взаимодействие клеток проводящей системы и желудочков происходит на эндокарде. Для клеток проводящей системы характерны: более высокая скорость возращения трансмембранного потенциала при возбуждении, большая продолжительность его действия, более низко расположенное плато, более ярко выраженный «зуб», более выраженная зависимость длительности действия трансмембранного потенциала от частоты возбуждения, возможность низкочастотного самовозбуждения при отсутствии внешнего сигнала [1]. Изменение ткани миокарда в результате таких заболеваний, как инфаркт миокарда, приводит к изменению электрической проводимости сердечной мышцы и искажает нормальное течение электродинамических процессов. Это может спровоцировать возникновение автоколебательных режимов в миокарде, которые воспринимаются больным как аритмия.

В статье представлены результаты численного моделирования электродинамических процессов в миокарде, позволяющие проанализировать автоколебательные режимы миокарда, а также выявить факторы, способствующие возникновению этих явлений и, наоборот, блокирующие их развитие.

### Создание геометрического образа сердца

Разработка математической модели электродинамики миокарда начинается с построения геометрического образа такой многоуровневой структуры, как сердце. В настоящее время для построения геометрического образа миокарда успешно используются томографическое сканирование. Геометрический образ, получаемый в результате этой процедуры, представляет собой совокупность образов плоских сечений органа, выполненных с определенным шагом. Для построения трехмерного геометрического образа из образов плоских сечений используются различные подходы. Среди них можно выделить метод ручного построения контуров отдельных сечений с последующим автоматическим объединением в трехмерный образ [2], метод деформируемых поверхностей [3].

В наших исследованиях был использован итерационный метод фронтального роста [4], отличающийся простотой реализации и универсальностью. При его использовании исследуемая область представляется как совокупность подобластей, отличающихся по интенсивности сигнала. На каждой итерации к текущей области роста добавляются соседние подобласти, удовлетворяющие заданному критерию подобия. В результате образ сердца выстраивается как совокупность объемных структур, каждая из которых имеет свои индивидуальные признаки. На основе этого метода построен автоматический алгоритм [5], позволяющий получить замкнутую область сложной конфигурации. Он обладает высокой скоростью, применим для односвязных и многосвязных областей.

Из образов, полученных в результате работы алгоритмов роста, невозможно без дополнительной обработки построить геометрическую модель, пригодную для создания конечно-элементного аналога сердца. Это обусловлено двумя причинами. Первая заключается в зашумленности томографического образа. Вторая обусловлена тем, что полученный в результа-



те обработки исходных томограмм образ воспроизводит многочисленные разно-масштабные структуры сердца, такие как трабекулярные и папиллярные мышцы, элементы коронарной системы и прочие. Их учет при дальнейшем моделировании приводит к неоправданно высоким вычислительным затратам.

Для преодоления описанных проблем разработан алгоритм фильтрации [6], который является обобщением известных методов морфологической фильтрации – расширения и эрозии [7]. Обработка томографических снимков с помощью этого алгоритма позволила получить объемный образ, в котором сердце человека представлено без излишних подробностей. На рис. 1 показан исходный образ сердца, полученный на основе томограммы, и образ после фильтрации, в котором выделены только полости сердца человека.

Заключительным этапом построения геометрической модели органа является создание конечно-элементной сетки. Для этого необходимо выделить поверхность, ограничивающую построенный объем, и провести ее обработку (триангуляция, устранение самокасааний, сглаживание, огрубление). После этого она импортируется в пакеты программ, позволяющие выполнять модификацию поверхности и построение на ее основе объемной сетки.

### Распространение возбуждения в сердечной мышце

Сердечная мышца состоит из сердечных клеток – миоцитов, находящихся в

межклеточной среде. Содержимое миоцитов (миоплазма) отделено от межклеточной среды клеточной мембраной, обладающей низкой проводимостью. Благодаря этой мембране сохраняется разность потенциалов между миоплазмой и межклеточной средой. Клеточная мембрана пронизана ионными каналами, делающими возможным обмен зарядами между разделяемыми средами. Некоторые из этих каналов образуют ионообменники и ионные насосы, которые обеспечивают перенос ионов в направлении, противоположном тому, которое обусловлено градиентом концентрации ионов или электрическим полем. Смежные клетки связаны щелевым соединением, через которое они могут обмениваться питательными веществами, продуктами обмена веществ и ионами [9]. Благодаря щелевому соединению миоплазма может рассматриваться как единое целое – внутриклеточное пространство [8].

Распространение сигнала в сердечной мышце основывается на процессе деполяризации. Когда клетка находится в состоянии покоя, существует разность потенциалов между внутриклеточным и межклеточным пространством. Потенциал внутри клетки отрицателен по сравнению с межклеточным потенциалом. При возбуждении происходит деполяризация – разность потенциалов меняется с отрицательной на малую положительную. Деполяризация – очень быстрый процесс, за которым следует более медленная реполяризация, восстанавливающая разность потенциалов, характерную для состояния покоя [8].

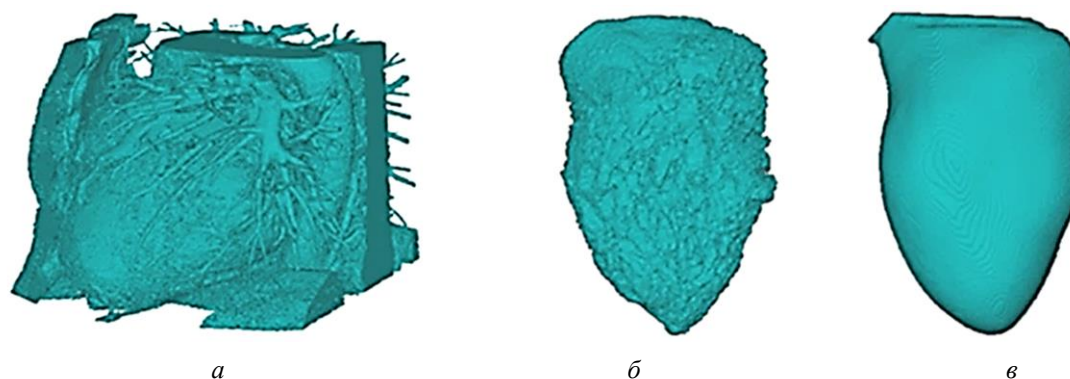


Рис. 1. Преобразование образа левого желудочка сердца человека: исходный образ по материалам мультисрезовой томографии (а), на последовательных этапах фильтрации (б, в)

С макроскопической точки зрения сердечная мышца может рассматриваться как две взаимопроникающие неоднородные анизотропные проводящие среды – внеклеточное пространство и внутриклеточное пространство, взаимодействующие через мембрану [8, 9]. Каждая из этих двух сред характеризуется своим тензором проводимости. Построенная на этих предположениях модель электрической активности сердца называется бидоменной. Она имеет вид

$$\nabla \cdot (D_i \nabla V_m) + \nabla \cdot (D_e \nabla V_e) = \chi I_m + \chi I_{is} + \tilde{I}_{is}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot ((D_i + D_e) \nabla V_e) + \nabla \cdot (D_i \nabla V_m) = \tilde{I}_{is} + \tilde{I}_{es}. \quad (2)$$

Здесь  $V_i$  – внутриклеточный потенциал,  $V_e$  – внеклеточный потенциал,  $V_m = V_i - V_e$  – трансмембранный потенциал,  $D_i$  – внутриклеточный тензор проводимости,  $D_e$  – внеклеточный тензор проводимости,  $I_m$  – трансмембранный ток,  $\chi$  – площадь клеточной мембраны на единицу объема,  $I_{is}$  – трансмембранный источник тока, например, связанный с действием активируемых деформацией каналов,  $\tilde{I}_{is}, \tilde{I}_{es}$  – внешние источники тока, подводимые к внутриклеточной и внеклеточной среде соответственно.

Трансмембранный ток может быть представлен как сумма емкостного тока, пропорционального скорости изменения трансмембранного потенциала, и тока, обусловленного движением ионов через мембрану  $I_{ion}$ :

$$I_m = C_m \frac{dV_m}{dt} + I_{ion}(V_m, \mathbf{r}). \quad (3)$$

Здесь  $C_m$  – емкость клеточной мембраны,  $\mathbf{r}$  – вектор внутренних переменных, изменение которых описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} - \mathbf{R}(V_m, r) = 0. \quad (4)$$

Система уравнений (1)–(4) принадлежит к уравнениям реакции-диффузии. Она является системой первого порядка

по времени, но благодаря нелинейности и немонотонности соотношений (4) может описывать самоподдерживающиеся волновые процессы.

Если предположить, что тензоры проводимости внутриклеточного и внеклеточного пространства подобны, то модель сердечной мышцы может быть значительно упрощена. Такая модель называется монодоменной. Её достаточно для большинства задач о распространении волн возбуждения в ткани миокарда [10]. Однако бидоменная модель необходима в тех случаях, когда принимается во внимание сам процесс возбуждения от внешних факторов [11].

Как бидоменные, так и монодоменные модели, в зависимости от того, как описываются соотношения между трансмембранным потенциалом и трансмембранным током, могут быть разделены на два класса – феноменологические и ионные. В феноменологических моделях, таких как модель Фицхью-Нагумо [12], Алиева-Панфилова [13], описывается только макроскопическое поведение клетки. В ионных моделях макроскопическое поведение клетки описывается через движение ионов сквозь клеточную мембрану, изменение концентрации ионов, ферментов и АТФ. В простейших из них, таких как модель Билера-Рейтера [14], ионные токи зависят от трансмембранного потенциала и воротных переменных. Эволюция последних описывается квазилинейными уравнениями с коэффициентами, зависящими от трансмембранного потенциала.

Ионные модели последнего поколения описывают не только перемещение ионов через клеточную мембрану, но и обмен ионами и ферментами между миоплазмой и внутриклеточными структурами [15]. Эти модели, с одной стороны, детально описывают электрохимическое поведение клетки. С другой стороны, они очень громоздки (число переменных может достигать 30 и более), что делает затруднительным их применение, когда речь идет о моделировании не отдельной клетки, а целого органа.

Многие феноменологические и ионные модели, описывающие электрическое поведение клеток сердца, можно найти в репозитории CellML [16].

**Модельные задачи  
электродинамических  
процессов в миокарде**

Основные электродинамические процессы в сердце могут быть продемонстрированы на модельных задачах, в которых рассматривается прохождение электрических сигналов в параллелепипеде, электропроводящие свойства которого соответствуют миокарду. Авторами была построена конечноэлементная модель распространения электрического возбуждения в миокарде [18, 19]. При реализации метода использовался конечно-элементный пакет FEniCS [17] с Python – интерфейсом.

При нормальной работе сердца основная волна потенциала действия в ткани миокарда формируется в результате работы синус-органа. Но из-за сбоев в работе проводящей системы Гиса могут возникать дополнительные импульсы электрического возбуждения, положение которых по отношению к основной волне может быть разным. На рис. 2 показано, как взаимодействует

основная волна с источником дополнительного возбуждения, расположенным в разных местах. Если источник дополнительного возбуждения оказывается за основной волной, характер распространения волны не меняется (рис. 2, а). Возбуждение, приложенное на «хвосте» основной волны, вызывает образование новой волновой структуры – спиральной волны (рис. 2, б), которая может самоподдерживаться даже после того, как основная волна прошла. Дополнительное возбуждение перед основной волной вызывает только искажение ее фронта (рис. 2, в). Появление спиральной волны провоцирует такие физиологические процессы, как аритмия.

Сердечная мышца является средой с неоднородной проводимостью. Эта неоднородность может усиливаться при некоторых заболеваниях сердца и приводить, в свою очередь, к возникновению патологических источников возбуждения. В работе [20] было теоретически продемонстрировано, какова должна быть геометрическая форма неоднородности, способной сгенерировать спиральную волну в миокарде. Она представляет собой узкий зазор между двумя непроводящими областями, который плавно рас-

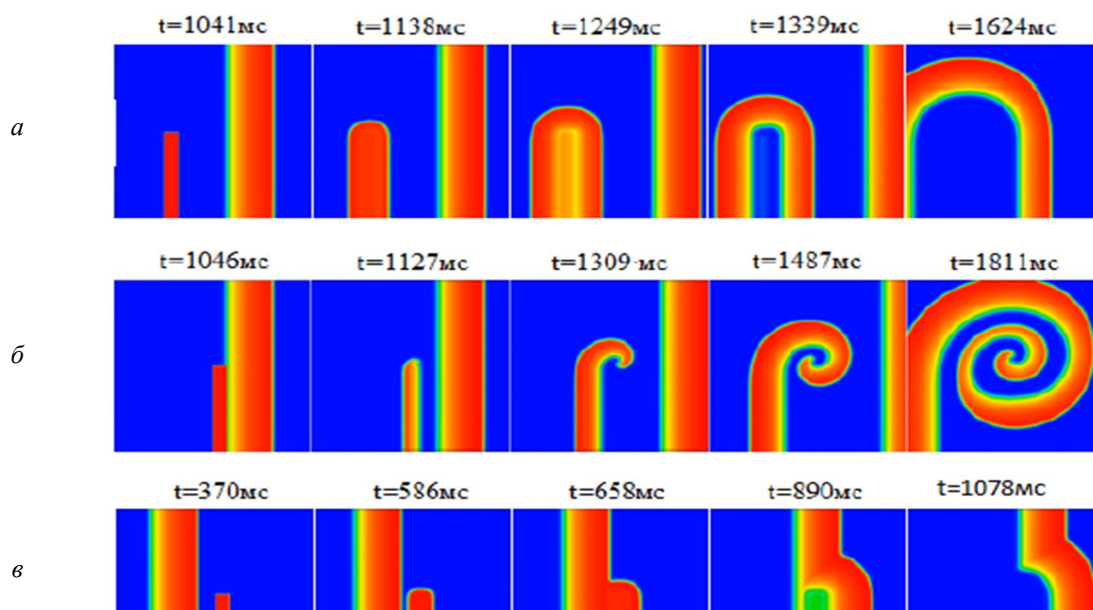


Рис. 2. Взаимодействие проходящей волны с источником дополнительного возбуждения:  
а – за волной, б – на хвосте волны, в – перед волной

ширятся в одном направлении и очень быстро – в противоположном. В [21, 22] было показано, какими должны быть сочетание формы и проводимости этих участков, чтобы в структуре сердца эта зона могла бы существовать. Кроме неоднородности по проводимости в миокарде может реализоваться неоднородность по длительности потенциала действия [21, 22]. На рис. 3, а изображена схема участка сердечной мышцы, на котором имеет место такая неоднородность. На рисунке в зоне 1 длительность потенциала действия имеет нормальное значение, в зоне 2 – в 5 раз меньше нормы и в зоне 3 – в 25 раз меньше нормы. Рис. 3, б демонстрирует зарождение и распространение циркулирующей волны, порожденной такой неоднородностью.

Благодаря волокнисто-слоистой организации сердечная мышца обладает ортотропными свойствами. Ориентация осей материальной симметрии меняется от эндокарда к эпикарду. В [22, 24] была построена модель распространения волны возбуждения в волокнисто-слоистой среде, соответствующей структуре миокарда. Рассмотрен модельный прямоугольный фрагмент ткани с толщиной, равной толщине сердечной стенки, и распределением углов ориентации волокон, отвечающим структуре левого желудочка собаки (рис. 4, а) [23]. Моделирование показывает, что при задании начального возбуждения в направлении продольной оси фрагмента волна возбуждения распространяется с большей скоростью в том слое, где проводимость в данном направлении наибольшая (рис. 4, б–г).

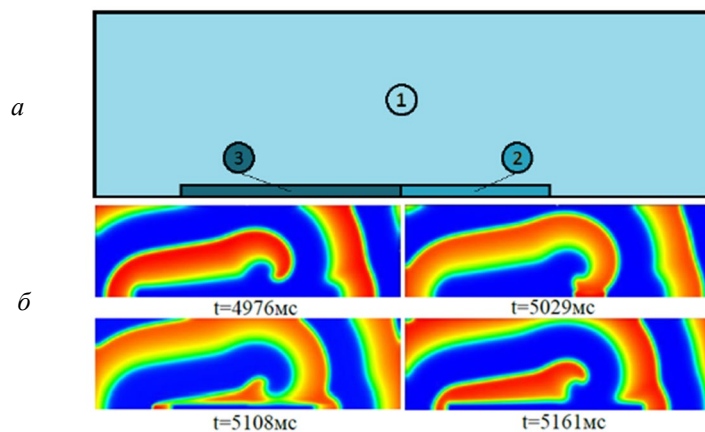


Рис. 3. Зарождение циркулирующей волны на неоднородности по длительности потенциала действия: а – схема неоднородности; б – циркулирующая волна

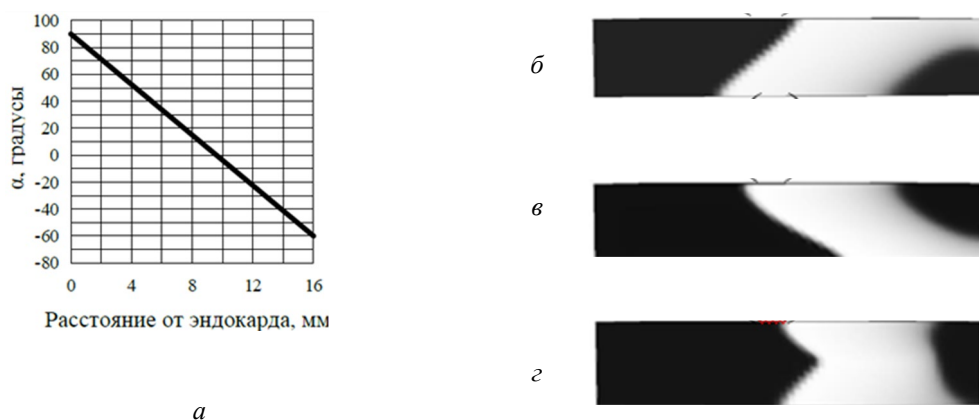


Рис. 4. Ориентации волокон в левом желудочке собаки (а) и форма волны возбуждения при первоначальном возбуждении на эндокарде (б), эпикарде (в) и в толще стенки (г)

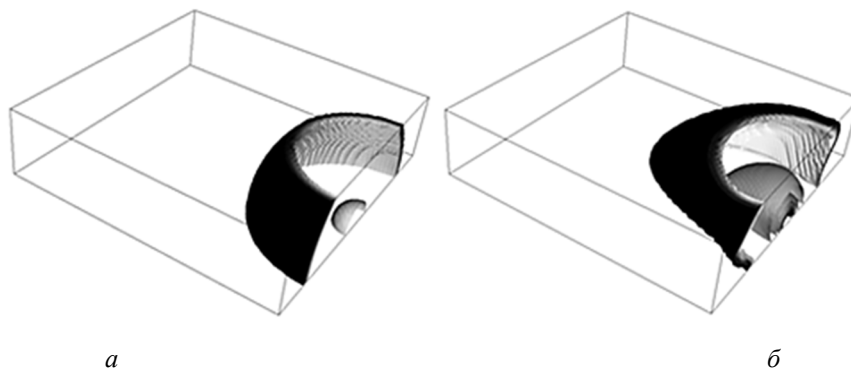


Рис. 5. Форма волны возбуждения от точечного начального возмущения в изотропной (а) и анизотропной модели миокарда, соответствующей левому желудочку собаки (б)

Если импульс представляет имеет точечную форму, фронт волны формирует-ся в виде сферы. На рис. 5 показана форма волны возбуждения от точечного импульса на эндокарде, расположенного в изотропной (а) и анизотропной (б) среде. Искажение сферической формы волны в анизотропном миокарде происходит за счет роста скорости распространения в каждом слое в направлении с наибольшей проводимостью.

Обобщая решения, полученные на модельных задачах, можно построить модель распространения электрических сигналов в теле, полностью воспроизводящем конфигурацию реального миокарда. На рис. 6 представлены результаты численного моделирования возникновения спиральной волны на трехмерной модели сердца человека. На кадрах (а) и (б) показан момент возбуждения в вершине сердца первоначальной волны. На кадре (в), соответствующем моменту времени  $t=507$  мс, виден момент образования дополнительной зоны

возбуждения которое далее распространяется по желудочку (кадр г) и формирует спиральную волну (кадр д), способную к самовоспроизведению.

### Моделирование взаимодействия миокарда с проводящей системой Пуркинью

Воздействие проводящей системы на ткани миокарда моделируется с помощью последовательного приложения локализованных в пространстве и времени объемных источников тока в местах, соответствующих соединению расположенных на эндокарде волокон Пуркинью с миокардом. Для получения координат этих точек контакта и времен задержки электрического сигнала строился геометрический образ сети Пуркинью, представляющий собой древовидную структуру. Его построение производилось с помощью алгоритма [25]. Время задержки для каждого узла соединения вычислялось как произведение длины пути по сети Пуркинью от корневого узла

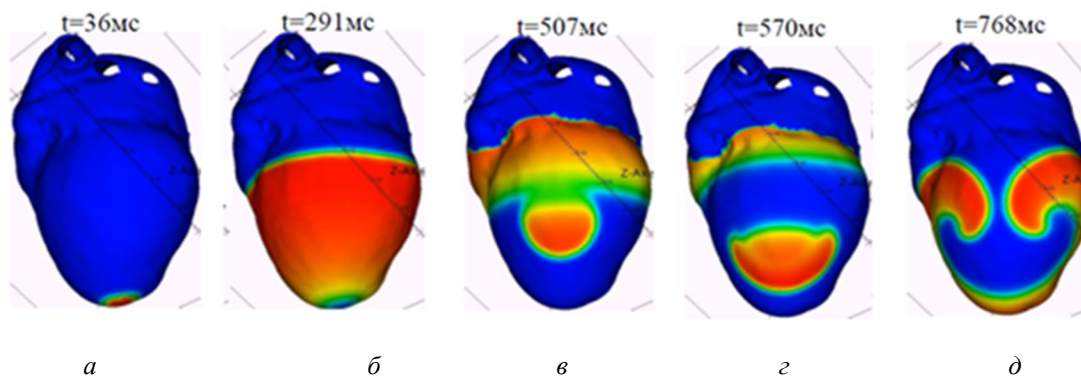


Рис. 6. Спиральные волны на трехмерной модели сердца

на скорость распространения волн возбуждения в волокнах Пуркинье. Предложенный в статье [25] алгоритм был адаптирован для совместного использования с конечноэлементной системой FENICS. Полученный геометрический образ показан на рис. 7, а.

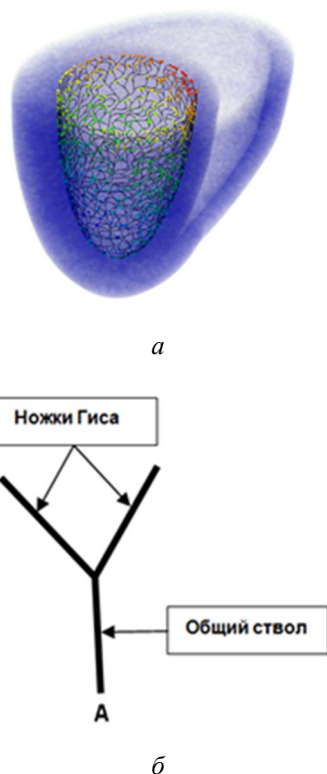


Рис. 7. Геометрический образ проводящей системы, полученный с помощью алгоритма FS Costabal и фрагмент проводящей системы

Взаимодействие сети Пуркинье с миокардом демонстрируется на тестовой задаче, в которой рассматривался прямоугольный блок сердечной ткани размерами 6,4×6,4×1,6 см. Воздействие проводящей системы моделировалось источниками тока, локализованными в зонах радиусом 2 мм, которые располагались на нижней поверхности блока в направлении, параллельном одной из граней (рис. 8). Длительность работы каждого источника составляла 2 мс, источники включались последовательно с интервалом 10 мс. Рис. 8 демонстрирует характер распространения волны возбуждения в ткани миокарда, вызванной такой последовательностью электрических импульсов.

Одной из распространенных патологий проводящей системы является блокада ножек пучка Гиса. В этом случае та область желудочка, которая должна была возбуждаться блокируемой частью проводящей системы, получает возбуждение через окружающие области желудочка. Это приводит к задержке возбуждения желудочка. Блокада может возникать как вследствие повреждения тканей проводящей системы, так и без видимых повреждений.

В [27] для моделирования блокады ножек пучка Гиса была рассмотрена Y-образная структура (рис. 7, б). Первоначальное возбуждение производилось в основании

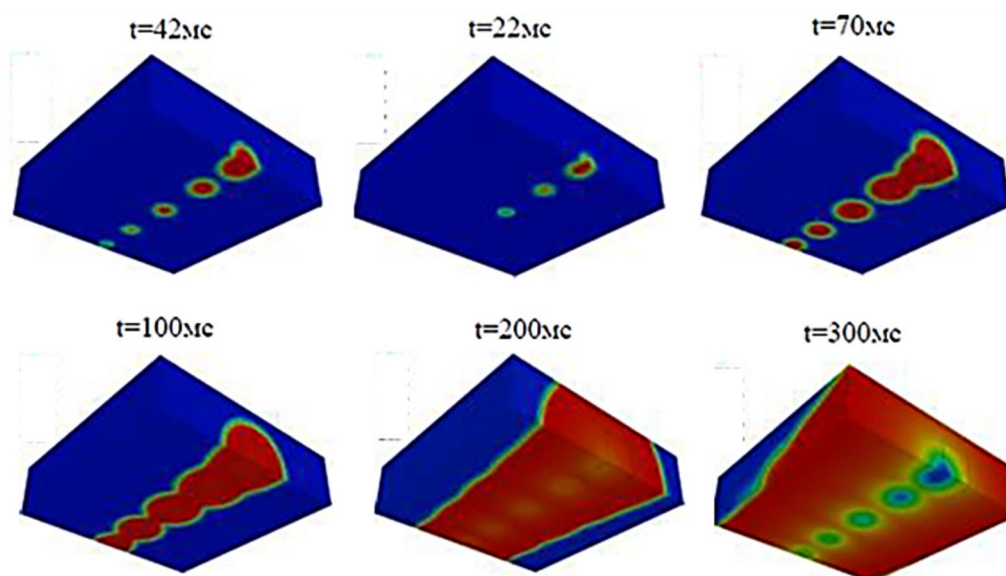


Рис. 8. Распространение волны возбуждения в результате воздействия проводящей системы

пучка. Соотношение между трансмембранным потенциалом и трансмембранным током описывалось соотношениями Ли-Руди [26], при этом варьировались проводимости общего ствола и ножек пучка Гиса.

Моделирование показало, что в зависимости от геометрических и физических параметров частей проводящей системы могут реализовываться три режима возбуждения ножек Гиса: возбуждение проходит из общего ствола пучка Гиса в ножки через разветвление, возбуждение не проходит, возбуждение проходит, но с задержкой. Задержка прохождения сигнала через ножки Гиса может привести к тому, что на эндокарде один из источников возбуждения может оказаться в опасном расположении относительно волны, вызываемой другим источником. В результате может возникнуть автоколебательный режим, который воспринимается как аритмия.

#### **Выводы и возможные направления дальнейшего исследования**

На основе математического моделирования электродинамических процессов в миокарде продемонстрирована возможность реализации некоторых сценариев

сбоев работы миокарда, вызывающих такие опасные для жизни состояния как аритмия миокарда. Показано, что причинами возникновения опасных вибрационных процессов в сердце могут быть определенные типы локальной неоднородности проводимости миокарда (например, в результате инфаркта). К числу последних относится наличие резко очерченных областей с отличающейся проводимостью или длительностью потенциала действия. На распространение волны возбуждения влияет волокнисто-слоистая структура миокарда. Продемонстрировано, что провоцирующим спиральные циркулирующие волны фактором могут быть также сбои в работе проводящей сети Пуркинье, связанные с блокадой некоторых участков сети.

Развитие подобных математических моделей открывает богатые возможности для построения решений, адаптированных под конкретного пациента. Это позволяет не только обнаруживать причины, приводящие к серьезным нарушениям работы сердца, но и разрабатывать мероприятия, в том числе оперативные, для устранения этих причин.

#### **Библиографический список**

1. *K.H.W.J. Ten Tusscher, Panfilov A.W.* Modelling of the ventricular conduction system // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. – 2008. – Vol. 96. – P. 152–170.
2. *Treece G.M., Prager R.W., Gee A.H., Berman L.* Surface interpolation from sparse cross sections using region // *Tras. Med. Imaging*. – 2000. – № 19. – Vol. 11. – P. 23–29.
3. *Li B., Acton S.* Active contour external force using vector field convolution for image segmentation // *Transaction on Medical Imaging*. – 2007. – Vol. 16. – № 8. – P. 38–44.
4. *Del Fresno M., Vénere M., Clausse A.* A combined region growing and deformable model method for extraction of closed surfaces in 3D CT and MRI scans // *Computerized Medical Imaging and Graphics*. – 2009. – Vol. 9. – № 3. – P. 182–199.
5. *Матвеевко В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Алгоритм создания трехмерных образов органов человека по томографическим данным // *Российский журнал биомеханики*. – 2011. – Т. 15. – № 4. – С. 20–32.
6. *Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Построение четырехкамерного геометрического образа сердца человека на основе рентгеновской томографии // *Российский журнал биомеханики*. – 2015. – Т. 19. – № 4. – С. 372–384.
7. *Kim W., Kim S.* 3D binary morphological operations using run-length representation // *Signal Processing: Image Communication*. – 2008. – Vol. 23. – P. 442–450.
8. *Sundnes J., Lines G.T., Xing Cai, Nielsen B.F, Mardal K-A, Tveito A.* *Computing the Electrical Activity in the Heart*. – Springer-Verlag, 2006.
9. *Sachse F.B.* *Computational Cardiology. Modelling of Anatomy*. – *Electrophysiology and Mechanics*. – Springer-Verlag, Berlin (2004).

10. *Potse M., Dube B., Richer J., Vinet A., Gulrajani R.M.* A Comparison of Monodomain and Bidomain Reaction-Diffusion Models for Action Potential Propagation in the Human Heart // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2006. – Vol. 53. – № 12. – P. 2425–2435.
11. *Wikswa J.P., Lin S.F., Abbas R.A.* Virtual Electrodes in Cardiac Tissue: A Common Mechanism for Anodal and Cathodal Stimulation // *Biophys. J.* – 1995. – Vol. 69. – P. 2195–2210.
12. *FitzHugh R.A.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Biophysical Journal*. – 1961. – Vol. 1. – № 6. – P. 445–466.
13. *Aliev R.R., Panfilov A.V.* A simple model of cardiac excitation. // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 1996. – Vol. 7. – № 3. – P. 293–301.
14. *Beeler G.W., Reuter H.* Reconstruction of the action potential of ventricular myocardial fibres. *J. Physiol.* – 1977. – Vol. 268. – № 1. – P. 177–210.
15. *Jafri M.S., Rice J.J., Winslow R.L.* Cardiac Ca<sup>2+</sup> dynamics: The roles of ryanodine receptor adaption and sarcoplasmic reticulum load. *Biophysical Journal*. – 1998. – Vol. 74. – P. 1149–1168.
16. CellML Model Repository [Электронный ресурс] – URL: <http://models.cellml.org/cellml/>.
17. The FEniCSx computing platform [Электронный ресурс] – URL: <https://fenicsproject.org/>.
18. *Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Конечноэлементное моделирование электрического возбуждения миокарда // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2014. – № 1. – С. 76–83.
19. *Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P., Wasserman I.N.* Development of finite element models for studying the electrical excitation of myocardium // *Acta Mechanica*. – 2014. DOI: 10.1007/s00707-014-1088-2. – pp. 1–17.
20. *Русаков А.В., Панфилов А.В., Медвинский А.Б.* Однонаправленный блок проведения одиночном автоволны в узком проходе и возникновение двумерного вихря зависят от геометрии препятствия и от возбудимости среды // *Биофизика*. 2003. – Т. 48. – № 4. – С. 722–726.
21. *Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Механизм зарождения аритмии сердца за счет патологического распределения проводимости миокарда // *Биофизика*. – 2016. – Т. 61. – № 2. – С. 352–358.
22. *Вассерман И.Н., Шестаков А.П.* Моделирование электродинамических, гидродинамических и деформационных процессов в системе «мышечная ткань сердца-сосуды-кровь». // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2016. – № 4. – С. 11–16.
23. *Nielsen P.M.F.* [et al.] Mathematical model of geometry and fibrous structure of the heart // *Am. J. Physiol.* 260(Heart Circ. Physiol. 29): H1365-H1378 (1991).
24. *Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Численное моделирование распространения электрического возбуждения в сердечной стенке с учетом её волокнисто-слоистой структуры // *Биофизика*. – 2015. – Т. 60. – № 4. – 2015. – С. 748–757.
25. *Costabal F.S., Hurtado D.E., Kuhl E.* Generating Purkinje networks in the human heart // *Journal of Biomechanics*. – 2016. – Vol. 49. – P. 2455–2465.
26. *Li P., Rudy Y.* A Model of Canine Purkinje Cell Electrophysiology and Ca<sup>2+</sup> Cycling. Rate Dependence, Triggered Activity, and comparison to Ventricular Myocytes // *Circulation Research*. – 2011. – Vol. 109. – P. 71–79.
27. *Вассерман И.Н., Шестаков А.П.* Моделирование распространения, задержки и блокировки импульса возбуждения в узлах проводящей системы сердца // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2018. – № 3. – С. 17–24. <https://doi.org/10.7242/1998-2097/2018.3.2>.



PROPAGATION OF ELECTRIC EXCITATION AND APPEARANCE  
OF AUTO-OSCILLATIONS IN HETEROGENEOUS MYOCARDIUM

Vasserman I.N., Shardakov I.N., Shestakov A.P.

*Institute of Continuum Media Mechanics UB RAS*

---

**For citation:**

Vasserman I.N., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Propagation of electric excitation and the appearance of auto-oscillations in an inhomogeneous myocardium // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 16–16. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.1>

---

Among the processes occurring in the cardiac tissue, the distribution of electrical excitation plays the leading role, since it determines and triggers all other processes in the myocardium. One of the dangerous cardiac disorders is the emergence of self-replicating wave processes that do not lead to contraction of the heart as a whole organ. Such processes may be caused by additional sources of electrical excitation, as well as by defects existing in the myocardium. The article presents the results of numerical simulation of electrodynamic processes in the myocardium, which makes it possible to analyze the myocardium autoscillatory modes and identify the factors contributing to the appearance of these phenomena and, on the contrary, blocking their development.

*Keywords: myocardium, tomographic image, finite element method, conducting system.*

**Сведения об авторах**

*Вассерман Игорь Николаевич*, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: igorw@icmm.ru

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

*Шестаков Алексей Петрович*, младший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: shap@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 06.12.2022 г.*

КОВАЛЕНТНАЯ ИММОБИЛИЗАЦИЯ  
АЛЬБУМИНА НА ПОВЕРХНОСТИ  
МЕДИЦИНСКОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО  
ПЛАЗМЕННО-ИММЕРСИОННОЙ ИОННОЙ  
ИМПЛАНТАЦИЕЙ \*

В.С. Чудинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН;  
Пермский государственный национальный исследовательский университет*  
И.Н. Шардаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*  
И.В. Кондюрина, *Университет Сиднея, Сидней, Австралия;  
Эвингар Сайнтифик, Эвингар, Австралия*  
Д. Маккензи, *Университет Сиднея, Сидней, Австралия*

**Для цитирования:**

Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Кондюрина И.В., Маккензи Д. Ковалентная иммобилизация альбумина на поверхности медицинского поливинилхлорида, модифицированного плазменно-иммерсионной ионной имплантацией // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 17–24.  
<https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.2>

Данная работа демонстрирует влияние плазменно-иммерсионной ионной имплантации на адсорбционную активность медицинского поливинилхлорида для гемоконтейнеров по отношению к белку альбумину. Образцы поливинилхлорида подвергались обработке ионами энергией 20 кэВ дозой  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. С помощью метода инфракрасной Фурье спектроскопии многократного нарушенного полного внутреннего отражения проанализированы изменения в молекулярной структуре после воздействия ионной обработки. Выполнен цикл физических экспериментов по нанесению и отмывке бычьего сывороточного альбумина на образцах необработанного и обработанного плазмой поливинилхлорида. Установлено, что белок ковалентно связывается с поверхностью поливинилхлорида, модифицированного методом плазменно-иммерсионной ионной имплантации. На необработанном поливинилхлориде белок адсорбируется без установления ковалентной связи с поверхностью и полностью смывается буферным раствором с ионным детергентом. По результатам предыдущих работ авторов об улучшении биосовместимости полимерных материалов, модифицированных методом ионной имплантации, предполагается, что ковалентное связывание белка в нативной конформации с поверхностью гемоконтейнера способствует сохранению в нем целостности клеток крови.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/875 от 04.04.2022г. и в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

**Ключевые слова:** ионная имплантация, ковалентная иммобилизация, биосовместимость, поливинилхлорид.

### Введение

По данным ВОЗ ежегодно в мире используется около 118,5 млн донаций крови. Кровь и ее компоненты широко применяются для гемотрансфузии и диагностики в медицине, биотехнологических процессах фарминдустрии и в научных исследованиях. Быстрое разрушение клеток крови *ex vivo* ограничивает логистические методы и хранение. В гемотрансфузионной медицине цельную кровь обычно перерабатывают в различные компоненты для специализированного хранения в течение 24 часов.

Для производства гемоконтейнеров используется поливинилхлорид [1]. Исследователи пытаются улучшить свойства данного материала разными химическими методами и физическим воздействием. Например, авторы одной из работ применяют химическую модификацию поливинилхлорида с помощью этиленгликоля, что улучшает смачиваемость поверхности полимера и препятствует адгезии тромбоцитов на его поверхности [2]. Другая группа ученых использует поэтапную плазменную обработку для усиления антибактериальных свойств материала [3]. Однако с нашей точки зрения, одной из наиболее важных задач является создание благоприятной поверхности для клеток, что позволит улучшить сохранение клеточной массы в гемоконтейнере.

Стоит отметить, что агрегирование клеток крови, побочные повреждения из-за активации лейкоцитов, лизис клеток с высвобождением хемокинов существенно влияют на здоровые и живые клетки [4–6]. Фактором разрушения клеток крови вне организма является в том числе материал стенки полимерного гемоконтейнера [7–8]. То есть поверхность полимерного контейнера оказывает разрушительное воздействие на клетки, вызывает реакцию и разрушение лейкоцитов, создавая агрессивную среду для клеточной массы во всем объеме гемоконтейнера [9]. Поверхность контей-

нера на основе поливинилхлорида не обладает достаточной биосовместимостью для сохранения клеточной массы.

Для изменения свойств поверхности поливинилхлорида с целью улучшения его биосовместимости мы будем использовать метод плазменно-иммерсионной ионной имплантации [10–11]. С помощью данного метода воздействия высокоэнергетических ионов на полимерный материал на его поверхности формируется карбонизованный слой, содержащий полиароматические конденсированные структуры с неспаренными электронами, стабилизированными  $\pi$ -электронным облаком на границах графитоподобных кластеров [12–14]. Поверхность карбонизованного слоя характеризуется улучшенной смачиваемостью и адсорбционной активностью к белкам [15]. При этом белки на поверхности карбонизованного слоя связываются ковалентной связью с помощью неспаренных электронов, замороженных по типу «эффекта клетки» [16–17], а гидрофильность поверхности карбонизованного слоя способствует сохранению нативной конформации и каталитической активности адсорбированных белков [18–19]. Также было ранее продемонстрировано, что на карбонизованной поверхности разных полимерных материалов клетки лучше делятся и распластаются, чем на необработанном ионами исходном полимерном материале [15, 20]. Улучшение свойств поверхности для клеток мы связываем со свойством карбонизованного слоя ковалентно адсорбировать белки в нативной конформации.

На данном этапе работ мы оценим изменение в молекулярной структуре и адсорбционную активность к белку альбумину образцов гемоконтейнера из поливинилхлорида (ПВХ), обработанных методом плазменно-иммерсионной ионной имплантацией (ПИИИ).

### Материалы и методы

*Подготовка образцов.* Для подготовки образцов поливинилхлорида использовался сдвоенный гемоконтейнер объемом 450 мл производства «Ravimed» (Польша). ПВХ содержал пластификатор ди(2-этилгексил)фталат (ДОФ) в концентрации 40%. Из гемоконтейнера вырезались образцы размером 1x5 см. Для удаления излишков пластификатора с поверхности поливинилхлорида образцы отмывались в деионизированной воде с сопротивлением 18 МОм·см и сушились в термошкафе при температуре 50°C.

*Плазменно-иммерсионная ионная имплантация.* Для ионной обработки в плазме плоские образцы поливинилхлорида помещались на металлический плоский держатель, соединенный с высоковольтным источником питания, и закрывались металлической сеткой, соединенной с держателем. Держатель помещался в вакуумный реактор, состоящий из верхней алюминиевой части, стеклянной средней части и нижней части из нержавеющей стали. Откачивание воздуха из реактора осуществлялось с помощью спирального безмасляного насоса и турбомолекулярного насоса до давления  $10^{-5}$  Торр. Затем реактор заполнялся азотом особой чистоты до давления 2 мТорр, которое поддерживалось при постоянной работе насосов. Для создания плазмы использовался генератор ЕМІ, генерирующий сигнал с выходной мощностью 100 Вт на частоте 13,75 МГц. Импульсы подавались на антенну, расположенную снаружи стеклянной части реактора. Антенна охлаждалась потоком воздуха от вентилятора. В верхней части реактора располагались электромагнитные катушки, через которые пропускался постоянный ток от двух источников питания. Магнитное поле подбиралось таким образом, чтобы плазма сжималась в столб диаметром 200 мм в верхней части реактора, где находился держатель образцов. Регистрация плотности плазмы производилась зондом Лэнгмюра. Плотность ионов составляла  $10^{10}$  ионов/см<sup>3</sup>, энергия ионов около 0,01 эВ, энергия электронов 5 эВ.

На держатель подавались импульсы высокого напряжения от высоковольтного источника на основе сильноточного тетрода и генератора импульсов. Величина напряжения составляла 20 кВ, длительность импульса 20 микросекунд, частота повторения импульсов 50 Гц. Средний ток составлял 1,2–1,3 мА. Согласно ранее определенной плотности потока ионов, образцы поливинилхлорида обрабатывались в течение 800 секунд, что соответствует флюенсу  $10^{16}$  ионов на квадратный сантиметр (ионов/см<sup>2</sup>).

*Поверхностная структура полимера после воздействия плазмы.* Изменения в химической структуре поверхностного слоя наблюдались по инфракрасным Фурье-спектрам многократного нарушенного полного внутреннего отражения (Фурье-ИК МНПВО), которые регистрировались на спектрометре Digilab (Австралия) со спектральным разрешением 4 см<sup>-1</sup> и числом сканов 500. Использовалась приставка МНПВО Harrick (США) с кристаллом германия размером 1x5 см<sup>2</sup> с углом падения луча 45-градусов. Для анализа использовалось спектральное программное обеспечение Resolution Pro. Для исключения спектра паров воды отдельно регистрировался спектр остаточных паров воды в спектрометре и вычитался из спектра полиуретана с нормировочным коэффициентом, который подбирался к каждому спектру для полного вычитания спектра воды. При наблюдении специфических линий спектра клея, применяемого для фиксации кристалла германия в держателе приставки МНПВО, его спектр вычитался из спектра образцов полимеров. Для анализа линий спектра использовались метод линейной базовой линии и вычитание спектров с нормировочным коэффициентом.

Заметим, что глубина проникновения инфракрасного луча в полимер из кристалла германия составляет от 800 до 400 нм в зависимости от диапазона волновых чисел спектра. В то же время толщина модифицированного поверхностного слоя составляет не более 100 нм. Таким образом, в спектре присутствует

вклад слоя полимера, лежащего намного глубже, чем модифицированный слой. По этой причине анализировались разностные спектры, построенные путем вычитания из спектра образца поливинилхлорида, обработанного плазмой, спектра необработанного поливинилхлорида.

**Адсорбция белка.** Для анализа адсорбированных белков использовался метод Фурье-ИК спектроскопии МНПВО. Необработанные и обработанные плазмой образцы поливинилхлорида помещались в буферный раствор бычьего сывороточного альбумина с концентрацией 50 мкг/мл при комнатной температуре (23°C) и выдерживались там 2, 4 и 24 часа.

После ионно-плазменной обработки образцы подвергались отмывке двумя различными способами: первый – с 5-кратной отмывкой в буферном растворе, второй – с отмывкой в 2% растворе додецилсульфата натрия (ДСН) при 80°C в течение часа и последующей 5-кратной отмывкой в буферном растворе. Все отмывки выполнялись в сменяемой при каждой итерации кювете Фалькон. После этого в обоих случаях следовала завершающая отмывка в деионизированной воде и просушивание образцов на воздухе в течение 24 часов в чашках Петри, закрытых от пыли. Таким же образом отмывались необработанные плазмой образцы.

Контрольный образец также выдерживался в буферном растворе, но без белка, и промывался в буфере и деионизированной

воде. Одновременная и одинаковая подготовка образцов с белком и без белка позволила использовать процедуру вычитания спектров, получить очень низкий сигнал полимера в разностном спектре и наблюдать спектр адсорбированного белка. При построении разностного спектра амплитуда всего спектра контрольного образца поливинилхлорида без белка умножалась на подгоночный коэффициент, так чтобы исключить из результирующего спектра вклад, вносимый поливинилхлоридом. Интенсивность линии пептидной связи белка Амид I при 1650 см<sup>-1</sup> нормировалась на линию ПВХ 1380 см<sup>-1</sup>.

### Результаты и обсуждение

**Поверхностная структура полимера после воздействия плазмы.** Спектр Фурье-ИК МНПВО необработанного ПВХ содержит интенсивные линии 2960, 2930, 2872 и 2859 см<sup>-1</sup>, относящиеся к колебаниям  $\nu(\text{C-H})$  в макромолекуле ПВХ и пластификаторе ДОФ, линию 1723 см<sup>-1</sup>, относящуюся к колебаниям  $\nu(\text{C=O})$  в молекуле пластификатора, линию 1463 см<sup>-1</sup>, относящуюся к колебаниям  $\nu(\text{C-H})$  в макромолекуле ПВХ и пластификаторе, и линию 1257 см<sup>-1</sup>, относящуюся к колебаниям  $\nu(\text{C-O})$  в молекуле пластификатора (рис. 1, кривая *a*). Кроме основных пиков есть ряд линий, относящихся к колебаниям сложной формы макромолекулы ПВХ и пластификатора.

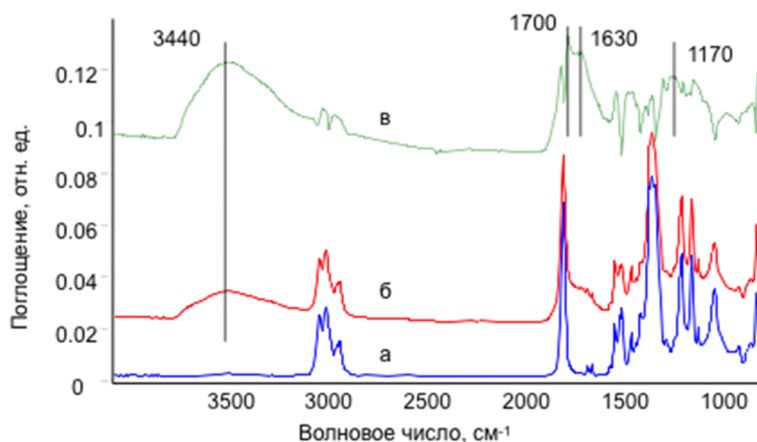


Рис. 1. Спектры Фурье-ИК МНПВО ПВХ: необработанного (*a*), обработанного в течение 800 с (*б*) и их разностный спектр (*в*)

После обработки ПВХ на установке ПИИИ ионами азота с энергией 20 кэВ и флюенсом  $10^{16}$  ионов/см<sup>2</sup> спектр Фурье-ИК МНПВО изменился. Появились сильная и широкая линия в области высоких частот и небольшой контур поглощения в области 1 700–1 650 см<sup>-1</sup>. Однако спектр ПВХ мультиплетный и наблюдение новых линий затруднено. Для более точного наблюдения анализировался разностный спектр, представленный кривой (*в*) на рис. 1. Разностный спектр показал схожесть со спектром обработанного полиэтилена [21]. Наблюдается линия колебаний гидроксильных и аминных групп с максимумом при 3 440 см<sup>-1</sup>. Наблюдается сложный контур линии колебаний C=O и C=N с максимумами при 1 700 и 1 630 см<sup>-1</sup>. Наблюдается широкий контур поглощения колебаний C-O с максимумом 1 170 см<sup>-1</sup>. Аналогичные изменения спектра в обработанном полимере отмечались и в случае полиэтилена. Кроме того, в разностном спектре ПВХ заметны отрицательные пики, соответствующие уменьшению интенсивности линии при 1 723 см<sup>-1</sup>, отнесенной к колебаниям  $\nu(\text{C=O})$  в молекуле пластификатора, и линий 1 434, 1 425, 1 254, 1 333 и 956 см<sup>-1</sup>, отнесенных к колебаниям различного типа в фрагменте макромолекулы ПВХ, связанной с атомом хлора. Это означает относительное уменьшение интенсивности данных линий в спектре обработанного ПВХ и соответствующее уменьшение концентрации групп, связанных с атомом хлора. То есть в результате ионно-плазменной обработки происходит дехлорирование поверхностного слоя ПВХ. А уменьшение интенсивности линии пластификатора означает обеднение поверхностного слоя пластификатором.

*Адсорбция белка.* Серия рисунков 2–4 отражает результаты исследования поверхностного слоя альбумина, сформированного на образцах ПВХ.

На рис. 2 показаны спектры альбумина на поверхности необработанного и обработанного ПВХ. Анализ показал присутствие линий белка Амид А при

3 300 см<sup>-1</sup>, Амид 1 при 1 650 см<sup>-1</sup> и Амид 2 при 1 540 см<sup>-1</sup> в спектре обработанного ПВХ и их отсутствие в спектре необработанного ПВХ.

На рис. 3 и 4 проанализировано влияние продолжительности адсорбирования белка из раствора на состав сформированного поверхностного слоя.

В эксперименте с первым способом отмывки не удалось выявить корреляцию между величиной сформированного белкового слоя и длительностью процесса адсорбции. Количество белка, адсорбированного на поверхности необработанного и обработанного плазмой ПВХ, не изменилось при изменении длительности адсорбции в пределах от 2 до 24 часов.

Возможной причиной наблюдаемого разброса данных является частичное перекрытие линий пластификатора при 1 720 см<sup>-1</sup> с линией Амид 1 при 1 650 см<sup>-1</sup>. Несмотря на вычитание спектра, не удается одним подгоночным коэффициентом при получении разностного спектра учесть отклонение концентрации пластификатора в ПВХ около поверхности и полностью вычесть одновременно спектр ПВХ и пластификатора.

В эксперименте со вторым способом отмывки наблюдается прямая зависимость количества адсорбированного белка от длительности экспозиции образцов в растворе с белком. Тогда возможной причиной разброса данных в эксперименте с отмывкой белка первым способом являются повторная адсорбция десорбированного белка на поверхности и стохастическое течение процесса отмывки, в то время как при использовании ионного поверхностно-активного вещества при отмывке происходит блокирование ионного взаимодействия десорбированного белка. Например, белок, адсорбированный на поверхности поливинилхлорида в течение 2 часов, полностью отмывается раствором с ионным детергентом.

Стоит отметить, что белок, адсорбированный на поверхности обработанного плазмой поливинилхлорида, наблюдается после обоих типов отмывки и при всех

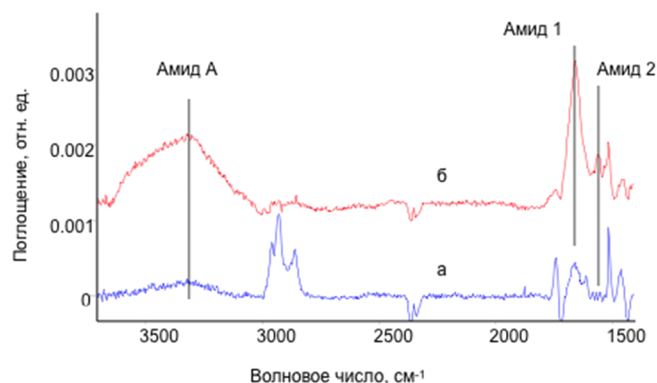


Рис. 2. Спектры Фурье-ИК МНПВО адсорбированного альбумина на поверхности необработанного (а) и обработанного (б) ПВХ

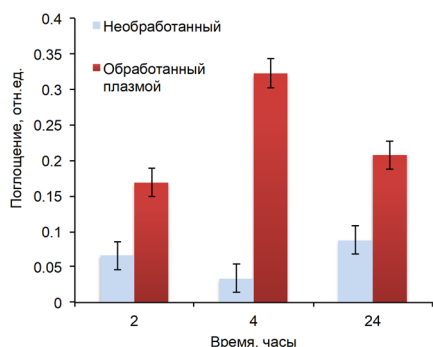


Рис. 3. Поглощение линии Амид I в спектре Фурье-ИК МНПВО ПВХ с нанесенным на поверхность альбумином (отмывка первым способом только в буферном растворе)

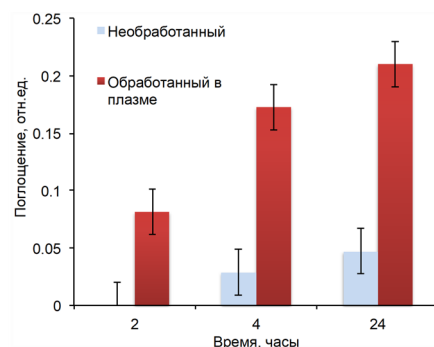


Рис. 4. Поглощение линии Амид I в спектре Фурье-ИК МНПВО ПВХ с нанесенным на поверхность альбумином (отмывка вторым способом в ДСН и буферном растворах)

длительностях адсорбции белка. Интенсивность линий Амид I альбумина на поверхности обработанного плазмой поливинилхлорида намного превышает интенсивность этих же линий белка на необработанном полимере. Таким образом, белок адсорбируется на образцах поливинилхлорида, модифицированного методом ПИИИ, с ковалентным связыванием с поверхностью полимера, что ранее было показано в наших работах с другими полимерными материалами [13, 15, 16, 18–21]. Согласно нашим представлениям о биосовместимости и результатам предыдущих работ, ковалентная иммобилизация белка на поливинилхлориде, модифицированном плазмой, позволит улучшить взаимодействие клеток с поверхностью гемоконтейнера.

### Заключение

Результаты ИК-Фурье спектроскопии МНПВО поверхностного слоя показывают дехлорирование поверхностного

слоя поливинилхлорида после плазменной обработки, образование новых групп, в т.ч. гидроксильных и аминных. Аналогичные изменения наблюдались в карбонизованном слое, сформированном на полиэтилене методом плазменно-иммерсионной ионной имплантации. Показано, что бычий сывороточный альбумин ковалентно связывается с поверхностью поливинилхлорида, модифицированного методом плазменно-иммерсионной ионной имплантации. На необработанном поливинилхлориде белок адсорбируется без установления ковалентной связи с поверхностью и может быть полностью смыт буферным раствором с ионным детергентом. Возможно, что ионно-плазменная обработка поверхности поливинилхлорида благоприятно повлияет на его взаимодействие с культурой клеток и на сохранение клеток крови в гемоконтейнере.

Библиографический список

1. Hansen O.G. New developments in PVC // Medical device technology. – 2008. – Vol. 19. – № 6. – P. 17–19.
2. Balakrishnan B., Kumar D.S., Yoshida Y., Jayakrishnan A. Chemical modification of poly(vinyl chloride) resin using poly(ethylene glycol) to improve blood compatibility // Biomaterials. – 2005. – Vol. 26. – № 17. – P. 3495–3502. doi:10.1016/j.biomaterials.2004.09.032.
3. Zhang W., Chu P.K., Ji J. [et al.] Plasma surface modification of poly vinyl chloride for improvement of antibacterial properties // Biomaterials. – 2006. – Vol. 27. – № 1. – P. 44–51. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.05.067.
4. Wong K., Sandlin R., Carey T. [et al.] The role of physical stabilization in Whole Blood Preservation // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – Article № 21023. https://doi.org/10.1038/srep21023.
5. Barshtein G., Arbell D., Livshits L., Gural A. Is it possible to reverse the storage-induced lesion of red blood cells // Frontiers in physiology. – 2018. – Vol. 9 914. doi: 10.3389/fphys.2018.00914.
6. Tsvetkova N.M., Torok Z., Satpathy G. [et al.] New technology for red blood cell preservation // Blood. – 2004. – Vol. 104. – № 11. – P. 2710. doi: https://doi.org/10.1182/blood.V104.11.2710.2710.
7. Gulliksson H., Meinke S., Ravizza A. [et al.] Storage of red blood cells in a novel polyolefin blood container: a pilot in vitro study. // Vox Sang. – 2017. – Vol. 112. – P. 33–39. https://doi.org/10.1111/vox.12472.
8. Волкова Л.В., Гришина Т.А. Влияние гемопластика различных производителей на продуктивную способность клеток млекопитающих // Биофармацевтический журнал. – 2019. – Т. 11. – № 2. – С. 11–15.
9. Агапов И.И. [и др.] Биосовместимые материалы / под ред. Севастьянова В.И., Кирпичникова М.П. – М.: МИА, 2011. – 537 с.
10. Anders A. [et al.] Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition Ed. by Andre Anders. – New York: John Wiley and Sons, 2000. – 760 p.
11. Ensinger W. Semiconductor processing by plasma immersion ion implantation // Materials science & engineering. A. – 1998. – Vol. 253. – № 1 – 2. – P. 258–268. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00734-5.
12. Chudinov V.S., Shardakov I.N., Svistkov A.L., Kondyurin A.V. Polyurethane modified by plasma ion implantation // 10<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials - Research & Application. – Brno, Czech Republic, 2019. – P. 295–300.
13. Chudinov V., Kondyurina I., Terpugov V., Kondyurin A. Weakened foreign body response to medical polyurethane treated by plasma immersion ion implantation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – Vol. 440. – P. 163–174. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.12.026.
14. Kondyurin A., Bilek M. Ion Beam Treatment of Polymers. Application aspects from medicine to space. 2<sup>nd</sup> ed. – Oxford: Elsevier, 2014. – 268 p.
15. Чудинов В.С., Кондюрина И.В., Шардаков И.Н., Свистков А.Л., Осоргина И.В., Кондюрин А.В. Полиуретан для медицинского применения, модифицированный плазменно-ионной обработкой // Биофизика. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 444–454.
16. Кондюрина И.В., Чудинов В.С., Терпугов В.Н., Кондюрин А.В. Химическая пришивка альбумина на поверхность полиуретанового имплантата, модифицированного ионным пучком // Медицинская техника. – 2018. – № 4. – С. 19–21.
17. Рэнби Б. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. Пер. с англ. В.Б. Иванова / под ред. Н.М. Эмануэля. – М.: Мир, 1978. – 675 с.
18. Kondyurin A., Nosworthy N.J., Bilek M.M.M. [et al.] Surface attachment of horseradish peroxidase to nylon modified by plasma-immersion ion implantation // Journal of Applied Polymer Science. – 2011. – Vol. 120. – № 5. – P. 2891–2903. https://doi.org/10.1002/app.33355.
19. Kondyurin A.V., Naseri P., Tilley J.M.R. [et al.] Mechanisms for Covalent Immobilization of Horseradish Peroxidase on Ion-Beam-Treated Polyethylene // Scientifica. – 2012. – Vol. 2012. – Article ID 126170. https://doi.org/10.6064/2012/126170.
20. Kondyurina I., Shardakov I., Nechitailo G. [et al.] Cell growing on ion implanted polytetrafluorethylene // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 314. – P. 670–678. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.07.057.
21. Chudinov V.S., Shardakov I.N., Ivanov D.V. [et al.] Creation of functional cover for immobilization of biomolecules on polymer material // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2280. – Article ID 040012. https://doi.org/10.1063/5.0018044.



COVALENT IMMOBILIZATION OF ALBUMIN  
ON THE SURFACE OF MEDICAL POLYVINYL CHLORIDE MODIFIED  
BY PLASMA-IMERSION ION IMPLANTATION

Chudinov V.S.<sup>1,2</sup>, Shardakov I.N.<sup>1</sup>, Kondyurina I.V.<sup>3,4</sup>, McKenzie D.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Continuum Media Mechanics UB RAS*

<sup>2</sup>*Perm State National Research University*

<sup>3</sup>*University of Sydney, Sydney, Australia*

<sup>4</sup>*Ewingar Scientific, Ewingar, Australia*

---

**For citation:**

Chudinov V.S., Shardakov I.N., Kondyurina I.V., McKenzie D. Albumin covalent immobilization on the surface of medical polyvinylchloride modified by plasma-immersion ion implantation // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 17–24. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.2>

---

This work demonstrates the effect of plasma-immersion ion implantation on the adsorption activity of medical polyvinyl chloride for hemocontainers with respect to albumin protein. Polyvinyl chloride samples were treated with 20 keV ions at a dose of  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>. Using the method of infrared Fourier spectroscopy of multiple attenuated total internal reflection, changes in the molecular structure after exposure to ion treatment are analyzed. A series of physical experiments on the attachment and washing of bovine serum albumin on samples of untreated and plasma-treated polyvinyl chloride was performed. It has been shown that protein covalently binds to the surface of polyvinyl chloride modified by plasma-immersion ion implantation. On untreated polyvinyl chloride, the protein is adsorbed without establishing a covalent bond with the surface and is completely washed off by a buffer solution with an ionic detergent. According to the results of the authors' previous works on improving the biocompatibility of polymeric materials modified by ion implantation, it is assumed that covalent binding of the protein in its native conformation to the surface of the hemocontainer will contribute to preserving the integrity of blood cells in it.

*Keywords: ion implantation, covalent immobilization, biocompatibility, polyvinyl chloride.*

**Сведения об авторах**

Чудинов Вячеслав Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ассистент, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: chudinovsl@mail.ru

Шардаков Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, ИМСС УрО РАН; e-mail: shardakov@icmm.ru

Кондюрина Ирина Викторовна, доктор философии, исследователь, Эвингар Сайнтифик, Эвингар, Австралия; исследователь, Университет Сиднея, Сидней, Австралия; e-mail: info@ewingarscientific.com.au

Маккензи Дэвид, доктор философии, профессор, Школа Физики Университета Сиднея, Сидней, Австралия; e-mail: d.mckenzie@physics.usyd.edu.au

*Материал поступил в редакцию 27.12.2022 г.*

## СОВРЕМЕННОЕ ПОНИМАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИММУНОЛОГИЧЕСКОГО НЕОТВЕТА НА ТЕРАПИЮ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ \*

Е.В. Сайдакова, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

---

### Для цитирования:

Сайдакова Е.В. Современное понимание проблемы иммунологического неответа на терапию ВИЧ-инфекции // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 25–31.  
<https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.3>

---

ВИЧ-инфекция – хроническое, неизлечимое заболевание, которое активно распространяется среди всех слоев населения. Принимаемая пациентами ежедневно высокоактивная антиретровирусная терапия подавляет размножение вируса, чем способствует восстановлению численности и функциональности CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов, поддерживает здоровье и продлевает жизнь больных. Однако каждый ВИЧ-инфицированный пациент, начинающий лечение, сталкивается с существенным риском развития иммунологического неответа, когда вопреки, казалось бы, эффективному подавлению вирусной нагрузки иммунная система не демонстрирует признаков восстановления. У иммунологических неответчиков численность CD4<sup>+</sup> Т-клеток остается низкой, а сами иммунные клетки оказываются неспособными защитить организм.

Причины развития иммунологического неответа на высокоактивную антиретровирусную терапию в настоящее время малопонятны, что не позволяет приступить к разработке более эффективных подходов к лечению ВИЧ-инфекции. Вместе с тем, механизмы, обеспечивающие регенерацию CD4<sup>+</sup> Т-клеток в условиях иммунодефицита, находятся под пристальным вниманием исследователей. Большой вклад в их изучение вносят ученые Пермского федерального исследовательского центра. В настоящем кратком обзоре представлены основные результаты многолетней работы сотрудников лабораторий экологической иммунологии и молекулярной иммунологии «ИЭГМ УрО РАН» по исследованию причин и механизмов развития иммунологического неответа на высокоактивную антиретровирусную терапию у ВИЧ-инфицированных больных; предложены перспективные направления для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** ВИЧ-инфекция, CD4<sup>+</sup> Т-лимфоциты, высокоактивная антиретровирусная терапия, регенерация, иммунологический неответ.

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания «Роль метаболизма CD4<sup>+</sup> Т клеток памяти в нарушении регенерации иммунитета у ВИЧ-инфицированных пациентов на фоне антиретровирусной терапии»; номер государственной регистрации темы 121112500044-9.

С начала пандемии вирусом иммунодефицита человека (ВИЧ) были заражены более 85 млн человек. При этом Российская Федерация входит в мировую группу лидеров по росту заболеваемости [1]. Важно, что распространение эпидемии не ограничивается маргинальными группами: заболевание активно распространяется в общей популяции [2, 3]. Пугающая реальность такова, что наиболее пораженной группой являются лица трудоспособного, репродуктивного возраста: среди людей 15–49 лет 1,4 % инфицированы ВИЧ; а среди тех, кому 35–39 лет, болен каждый 50-й [4, 5].

В процессе развития ВИЧ-инфекции снижается численность и функциональность  $CD4^+$  Т-лимфоцитов – клеток, играющих важную роль в управлении иммунным ответом [6]. Дефицит этих иммунных клеток увеличивает риск общей заболеваемости и госпитализации, приводит к сокращению численности трудоспособного населения [7–9].

В настоящее время существует единственный метод контроля над развитием и распространением ВИЧ-инфекции: высокоактивная антиретровирусная терапия (ВААРТ). Принимаемые пациентами ежедневно антиретровирусные препараты подавляют размножение ВИЧ, чем способствуют восстановлению численности  $CD4^+$  Т-лимфоцитов [10]. Регенерация иммунной системы обеспечивает снижение заболеваемости, увеличивает продолжительность и качество жизни инфицированных лиц [11].

Эффективность ВААРТ оценивают по двум показателям: подавлению вирусной нагрузки (вирусологический ответ) и приросту числа  $CD4^+$  Т-лимфоцитов (иммунологический ответ) [12]. Эффективным вирусологическим ответом на лечение принято считать долговременное снижение числа вирусных частиц до неопределяемого уровня [13]; эффективным иммунологическим ответом – увеличение числа  $CD4^+$  Т-клеток до уровня 500/мкл и выше [14].

К сожалению, результат терапии зачастую оказывается неудовлетворительным. У трети ВИЧ-положительных пациентов, получающих лечение, развивается так называемый иммунологический неответ на ВААРТ [15]: после двух и более лет вирусологически успешной терапии численность  $CD4^+$  Т-лимфоцитов в крови больных остается низкой – менее 350/мкл. По сравнению с ВИЧ-положительными пациентами, давшими успешный ответ на лечение, у иммунологических неответчиков увеличен риск развития сердечно-сосудистых нарушений, болезней печени и почек, метаболического синдрома, нейрокогнитивных отклонений и злокачественных новообразований [16–20]. Низкое количество  $CD4^+$  Т-лимфоцитов не позволяет иммунологическим неответчикам эффективно отвечать на вакцинацию [21], увеличивает риск развития СПИД и преждевременной смерти [22, 23].

В настоящее время исследователям и врачам неизвестны причины, по которым у значительной части ВИЧ-инфицированных больных, получающих лечение, нарушается восстановление численности  $CD4^+$  Т-лимфоцитов. Поэтому разработка новых эффективных схем лечения не представляется возможной. Так как в будущем количество иммунологических неответчиков на ВААРТ будет только расти, изучение механизмов, лежащих в основе слабой регенерации  $CD4^+$  Т-клеток у ВИЧ-положительных больных, является актуальным и заслуживает пристального внимания.

Наша научная группа под руководством д.м.н. К.В. Шагеля исследует феномен иммунологического неответа на ВААРТ с 2011 г. За это время научным коллективом были воспроизведены известные и получены новые данные о причинах и механизмах развития данного синдрома. В настоящем коротком обзоре читателю будет представлено наше видение основных этапов формирования иммунологического неответа на ВААРТ, а также даны ссылки для самостоятельного ознакомления с экспериментальными данными, ставшими основой сформулированной нами концепции.

**Концепция развития  
иммунологического неответа  
на ВААРТ**

Длительное бесконтрольное течение ВИЧ-инфекции приводит к формированию глубокого дефицита CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов: численность клеток может опускаться ниже 200/мкл при норме 500–1200/мкл. На фоне этого состояния организм запускает процессы регенерации Т-клеток. Однако эти процессы недостаточно эффективны и без введения ВААРТ численность CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов продолжает неуклонно снижаться. В свою очередь, подавление вирусной нагрузки под действием антиретровирусных препаратов снимает часть нагрузки с иммунной системы, позволяя постепенно увеличить количество CD4<sup>+</sup> Т-клеток. Следует отметить, что чем позже пациент начинает лечение, тем меньше возможностей для регенерации сохраняется у его иммунной системы.

Восстановление численности CD4<sup>+</sup> Т-клеток идет сразу двумя путями: через продукцию новых наивных Т-лимфоцитов и деление зрелых – сформированных ранее – Т-клеток. Мы обнаружили, что у иммунологических неответчиков снижена функциональность тимуса, ответственного за производство наивных Т-лимфоцитов [24]. Ограниченное поступление новых CD4<sup>+</sup> Т-клеток не позволяет поддерживать размер их популяции и ее разнообразие; постепенно снижает способность организма развивать иммунный ответ на вновь поступающие угрозы. Это может служить одним из объяснений повышенного риска развития инфекционных и неинфекционных патологий у иммунологических неответчиков на ВААРТ.

В отсутствие продуцируемых тимусом новых наивных CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов основная нагрузка по восстановлению численности функциональных иммунных клеток ложится на процесс деления зрелых CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов, относящихся к субпопуляции клеток памяти [25]. Деление этих клеток запускается сигналами, возникающими вследствие иммунодефицита. Этот процесс известен как гомео-

статическая пролиферация (т.е. деление, призванное восстановить гомеостаз). Однако у иммунологических неответчиков интенсивная гомеостатическая пролиферация CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов не приводит к увеличению их числа. Деление CD4<sup>+</sup> Т-клеток часто сопровождается выраженной асимметрией, при которой дочерние клетки получают неравное количество белков, нуклеиновых кислот и липидов от «родительского» лимфоцита [25, 26]. Клетки, получившие в свое распоряжение меньше «строительных блоков», могут быть менее жизнеспособными, чем их более удачливые клоны.

Более того, при делении в CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитах развиваются и усугубляются дефекты митохондрий [27, 28] – органелл, играющих ключевую роль в метаболизме клеток. Так, митохондрии производят значительное количество энергии, участвуют в обмене жиров и углеводов, создают предшественники для синтеза белков. Однако в активно делящихся CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитах иммунологических неответчиков падает электрохимический потенциал митохондрий, что снижает их способность к генерации энергии. Более того, у иммунологических неответчиков митохондрии CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов производят меньше РНК для синтеза белков, участвующих в регуляции клеточного дыхания, обеспечивающих работу цикла трикарбоновых кислот, вовлеченных в метаболизм жирных кислот. Выявленные аномалии могут приводить к развитию дефектов энергетического обмена, существенно влияя на жизнеспособность CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов и, как следствие, уменьшать продуктивность их деления.

Полученные нами экспериментальные данные подтвердили, что у иммунологических неответчиков итогом многократной гомеостатической пролиферации CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов становятся иммунное истощение [29, 30] и программируемая гибель [31–33] клеток. Важно отметить, что хронический дефицит CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов неустанно вовлекает в гомеостатическую пролиферацию всё но-

вые клетки, что ведет к изменению их функциональности, снижению потенциала к делению, развитию нарушений в иммунной системе больных. В совокупности эти события способствуют тому, что у ВИЧ-инфицированных иммунологических ответчиков процесс гомеостатической пролиферации приобретает патологический характер и более не ведет к восстановлению численности и функциональности CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов.

Можно предположить, что снижение интенсивности гомеостатической пролиферации могло бы положительно сказаться на жизнеспособности CD4<sup>+</sup> Т-клеток иммунологических неответчиков на ВААРТ. Однако мы показали, что у данных больных нарушен процесс формирования регуляторных Т-лимфоцитов [27] – клеток, способных останавливать избыточное деление CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов. Следует отметить, что одна из важных субпопуляций регуляторных Т-клеток, известная как индуцированные регуляторные Т-лимфоциты, формируется из делящихся CD4<sup>+</sup> Т-клеток памяти для контроля над их активностью. У иммунологических неответчиков индуцированные (т.е. сформированные в процессе деления) регуляторные Т-лимфоциты «наследуют» проблемы своих «родителей»: в них проявляются дефекты митохондрий и склонность к гибели в процессе деления [27, 34, 35]. Малое количество и низкая функциональность индуцированных регуляторных Т-клеток у иммунологических неответчиков приводят к потере контроля над иммунной активацией и гомеостатической пролиферацией.

Причины развития дефектов митохондрий CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов у иммунологических неответчиков на ВААРТ в настоящее время остаются неясными. Однако уже сегодня мы показали, что эти дефекты обратимы. Так, нами установлено, что внешние стимулы, такие как белок интерлейкин-15, могут нормализовать состояние митохондрий и вернуть индуцированным регуляторным Т-лимфоцитам способность к делению [27]. Хотя механизм благоприятного

действия интерлейкина-15 на иммунocyты требует дальнейшего изучения, полученные результаты уверенно подталкивают к поиску и разработке новых препаратов, способных восстановить функциональность истощенных хронической гомеостатической пролиферацией CD4<sup>+</sup> Т-клеток у ВИЧ-инфицированных иммунологических неответчиков на ВААРТ.

### Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы, на наш взгляд, связана с изучением метаболизма CD4<sup>+</sup> Т-клеток у иммунологических неответчиков на ВААРТ. Проведенные ранее исследования убедительно показывают, что у иммунологических неответчиков на лечение нарушение в работе митохондрий тесно связано с непродуктивным делением и низкой жизнеспособностью обычных и индуцированных регуляторных CD4<sup>+</sup> Т-клеток. Однако не следует забывать, что внемитохондриальные процессы, такие как гликолиз, также производят многие химические предшественники нуклеиновых кислот, липидов и аминокислот – «строительных блоков» для дочерних лимфоцитов. Следовательно, необходимо уделить внимание различным аспектам метаболизма CD4<sup>+</sup> Т-клеток.

Перспективным, на наш взгляд, также является исследование возможности восстановления продуктивной функции тимуса у иммунологических неответчиков на ВААРТ. Поступление новых наивных CD4<sup>+</sup> Т-клеток может снизить интенсивность гомеостатической пролиферации CD4<sup>+</sup> Т-лимфоцитов и сократить негативные последствия такого деления: ограничить старение и истощение, расширить репертуар специфичностей Т-клеточных рецепторов. Более того, снижение интенсивности гомеостатической пролиферации, вызванное пополнением пула Т-лимфоцитов из тимуса, может способствовать увеличению жизнеспособности CD4<sup>+</sup> Т-клеток и более эффективной регенерации иммунной системы у ВИЧ-инфицированных больных, получающих терапию.

Библиографический список

1. UNAIDS Gap Report // Geneva: 2016. – С. 286.
2. Никифорова А.О. Некоторые медико-социальные аспекты населения, живущих с ВИЧ-инфекцией // Вестник совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2018. – Т. 2. – № 4. – С. 37–41.
3. Науменко В.В., Сологуб Т.В., Цветков В.В., Цыбалова Л.М. Характеристика эпидемического процесса и ведущих факторов риска распространения ВИЧ-инфекции в условиях крупного мегаполиса // Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы. – 2015. – Т. 6. – С. 15–18.
4. Антипова А.В., Емельянов В.В., Жильцова А.В., Козлова М.Л. Анализ распространенности ВИЧ-инфекции в России // Научный альманах. – 2019. – Т. 12–3. – № 62. – С. 87–89.
5. Федеральный научно-методический центр по профилактике и борьбе со СПИДом. Справка ВИЧ-инфекция в Российской Федерации на 30 июня 2020 г. // ФГБУН «Центральный научно-исследовательский институт эпидемиологии» Роспотребнадзора. – 2020. – С. 2.
6. Dolan M.J., Clerici M., Blatt S.P. [et al.] In vitro T cell function, delayed-type hypersensitivity skin testing, and CD4+ T cell subset phenotyping independently predict survival time in patients infected with human immunodeficiency virus // The Journal of Infectious Diseases. – 1995. – Vol. 172. – № 1. – P. 79–87.
7. Максумова Д.К., Салахитдинов З.С., Кодиров Д.А., Валиева М.Ю. Распространенность нарушений липидного обмена у ВИЧ-инфицированной популяции в возрасте 20–69 лет // Евразийский кардиологический журнал. – 2019. – Т. S1. – С. 45–46.
8. Guaraldi G., Zona S., Brothers T.D. [et al.] Aging with HIV vs. HIV seroconversion at older age: a diverse population with distinct comorbidity profiles // PLoS One. – 2015. – Vol. 10. – № 4. – P.e0118531.
9. Задорожная В.И., Антоняк С.Н., Матковский И.А., Юрченко А.В., Антоняк С.В. Распространенность сахарного диабета 2 типа у пациентов с ВИЧ-1 и антиретровирусная терапия – результаты обсервационного мультицентрового ретроспективного исследования // Клиническая инфектология и паразитология. – 2019. – Т. 8. – № 2. – С. 211–220.
10. Pakker N.G., Notermans D.W., de Boer R.J. [et al.] Biphasic kinetics of peripheral blood T cells after triple combination therapy in HIV-1 infection: A composite of redistribution and proliferation // Nature medicine. – 1998. – Vol. 4. – № 2. – P. 208–214.
11. Poorolajal J., Hooshmand E., Mahjub H., Esmailnasab N., Jenabi E. Survival rate of AIDS disease and mortality in HIV-infected patients: a meta-analysis // Public Health. – 2016. – Vol. 139. – P. 3–12.
12. Piketty C., Castiel P., Belec L. [et al.] Discrepant responses to triple combination antiretroviral therapy in advanced HIV disease // AIDS. – 1998. – Vol. 12. – № 7. – P. 745–750.
13. Yamashita T.E., Phair J.P., Munoz A. [et al.] Immunologic and virologic response to highly active antiretroviral therapy in the Multicenter AIDS Cohort Study // AIDS. – 2001. – Vol. 15. – № 6. – P. 735–746.
14. Xiao Q., Yan L., Han J. [et al.] Metabolism-dependent ferroptosis promotes mitochondrial dysfunction and inflammation in CD4(+) T lymphocytes in HIV-infected immune non-responders // EBioMedicine. – 2022. – Vol. 86. – P.104382.
15. Yang X., Su B., Zhang X. [et al.] Incomplete immune reconstitution in HIV/AIDS patients on antiretroviral therapy: Challenges of immunological non-responders // J. Leukoc Biol. – 2020. – Vol. 107. – № 4. – P. 597–612.
16. Baker J.V., Peng G., Rapkin J. [et al.] CD4+ count and risk of non-AIDS diseases following initial treatment for HIV infection // AIDS. – 2008. – Vol. 22. – №7. – P. 841–848.
17. Weber R., Sabin C.A., Friis-Moller N. [et al.] Liver-related deaths in persons infected with the human immunodeficiency virus: the D:A:D study // Archives of Internal Medicine. – 2006. – Vol. 166. – № 15. – P. 1632–1641.
18. Gutierrez F., Padilla S., Masia M. [et al.] Clinical outcome of HIV-infected patients with sustained virologic response to antiretroviral therapy: long-term follow-up of a multicenter cohort // PLoS One. – 2006. – Vol. 1. – P. e89.
19. Moore D.M., Hogg R.S., Chan K. [et al.] Disease progression in patients with virological suppression in response to HAART is associated with the degree of immunological response // AIDS. – 2006. – Vol. 20. – № 3. – P. 371–377.
20. Kaufmann G.R., Furrer H., Ledergerber B. [et al.] Characteristics, determinants, and clinical relevance of CD4 T cell recovery to <500 cells/microL in HIV type 1-infected individuals receiving potent antiretroviral therapy // Clinical Infectious Diseases. – 2005. – Vol. 41. – № 3. – P. 361–372.
21. Tantawichien T., Jaijaroensup W., Khawplod P., Sitprija V. Failure of multiple-site intradermal postexposure rabies vaccination in patients with human immunodeficiency virus with low CD4+ T lymphocyte counts // Clinical Infectious Diseases. – 2001. – Vol. 33. – № 10. – P. E122–124.

22. *Lapadula G., Cozzi-Lepri A., Marchetti G.* [et al.] Risk of clinical progression among patients with immunological nonresponse despite virological suppression after combination antiretroviral treatment // *AIDS*. – 2013. – Vol. 27. – № 5. – P. 769–779.
23. *Tan R., Westfall A.O., Willig J.H.* [et al.] Clinical outcome of HIV-infected antiretroviral-naive patients with discordant immunologic and virologic responses to highly active antiretroviral therapy // *Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes*. – 2008. – Vol. 47. – № 5. – P. 553–558.
24. *Сайдакова Е.В., Королевская Л.Б., Шмагель Н.Г., Шмагель К.В., Черешнев В.А.* Роль коинфекции вирусным гепатитом С в нарушении продуктивной функции тимуса у ВИЧ-инфицированных пациентов на фоне иммунологически неэффективной антиретровирусной терапии // *Медицинская иммунология*. – 2013. – Т.15. – № 6. – С. 545–554.
25. *Saidakova E.V., Shmagel K.V., Korolevskaya L.B.* [et al.] CD4+ T-Cell Cycling in HIV-Infected Patients with the Discordant Immunologic Response to the Antiretroviral Therapy // *Cell and Tissue Biology*. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 55–63.
26. *Сайдакова Е.В., Шмагель К.В., Королевская Л.Б.* [et al.] Пролиферация CD4+ Т-лимфоцитов при развитии дискордантного ответа иммунной системы на антиретровирусную терапию у ВИЧ-инфицированных больных // *Цитология*. – 2018. – Т. 60. – № 12. – С. 1029–1036.
27. *Younes S.A., Talla A., Pereira Ribeiro S.* [et al.] Cycling CD4+ T cells in HIV-infected immune nonresponders have mitochondrial dysfunction // *Journal of Clinical Investigation*. – 2018. – Vol. 128. – № 11. – P. 5083–5094.
28. *Сайдакова Е.В., Шмагель К.В., Королевская Л.Б., Шмагель Н.Г.* Дискордантный ответ CD4+ Т-лимфоцитов на антиретровирусную терапию у ВИЧ-инфицированных пациентов связан с нарушением энергетического обмена // *Российский иммунологический журнал*. – 2019. – Т. 13. – № 2. – С. 515–517.
29. *Saidakova E.V., Shmagel K.V., Korolevskaya L.B., Shmagel N.G., Chereshev V.A.* Lymphopenia-induced proliferation of CD4 T-cells is associated with CD4 T-lymphocyte exhaustion in treated HIV-infected patients // *Indian J Med Res*. – 2018. – Vol. 147. – № 4. – P. 376–383.
30. *Сайдакова Е.В., Шмагель Н.Г.* Истощение Т-лимфоцитов ВИЧ-инфицированных пациентов с неэффективным ответом иммунной системы на антиретровирусную терапию // *Российский иммунологический журнал*. – 2014. – Т. 8. – № 3. – С. 868–870.
31. *Сайдакова Е.В., Королевская Л.Б., Шмагель Н.Г., Шмагель К.В., Черешнев В.А.* Апоптоз Т-лимфоцитов у ВИЧ-инфицированных пациентов с нарушением восстановления иммунитета при проведении антиретровирусной терапии // *Доклады академии наук*. – 2013. – Т. 450. – № 1. – С. 116–118.
32. *Shmagel K.V., Saidakova E.V., Korolevskaya L.B.* [et al.] Influence of hepatitis C virus coinfection on CD4(+) T cells of HIV-infected patients receiving HAART // *AIDS*. – 2014. – Vol. 28. – № 16. – P. 2381–2388.
33. *Королевская Л.Б., Сайдакова Е.В., Шмагель Н.Г., Шмагель К.В.* Апоптоз CD4+ и CD8+ Т-лимфоцитов у ВИЧ-инфицированных пациентов с различной эффективностью восстановления иммунной системы при проведении антиретровирусной терапии // *Журнал инфектологии*. – 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 36–40.
34. *Saidakova E.V., Shmagel K.V., Shmagel N.G., Korolevskaya L.B., Chereshev V.A.* Changes in the regulatory T-lymphocyte counts in HIV-infected patients with a discordant response to antiretroviral therapy // *Dokl. Biol. Sci.* – 2019. – Vol. 487. – P. 128–131.
35. *Королевская Л.Б., Сайдакова Е.В., Шмагель Н.Г., Шмагель К.В.* Субпопуляционный состав регуляторных Т-клеток периферической крови у ВИЧ-инфицированных пациентов с дискордантным ответом на антиретровирусную терапию // *Медицинская иммунология*. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 281–290.

**A CONTEMPORARY VIEW OF IMMUNOLOGICAL NON-RESPONSE  
TO HIGHLY ACTIVE ANTIRETROVIRAL THERAPY**

Saidakova E.V.

*Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS*

**For citation:**

*Saidakova E.V.* A contemporary view of immunological non-response to highly active antiretroviral therapy // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 25–31. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.3>

HIV-infection is a chronic, incurable disease that actively spreads among all social groups. Highly active antiretroviral therapy, when taken daily, suppresses viral replication, thus contributing to the restoration of the CD4<sup>+</sup> T-lymphocytes' number and functionality, maintaining patients' health and prolonging their lives. However, every HIV-infected patient starting the treatment faces a significant risk of developing an immunological non-response when, despite the effective viral load suppression, the immune system does not show any signs of recovery. In immunological non-responders, the number of CD4<sup>+</sup> T-cells remains low, and the lymphocytes are unable to protect from diseases. The reasons for developing immunological non-response to highly active antiretroviral therapy are poorly understood, which does not allow the advancement of more effective approaches to treat HIV-infection. Nevertheless, the mechanisms that ensure the CD4<sup>+</sup> T-cells regeneration are under close attention of researchers. Scientists from the Perm Federal Research Center made a great contribution to this study. The current brief review presents the main results of the longstanding work fulfilled by the staff of the Laboratory of Ecological Immunology and the Laboratory of Molecular Immunology of the "IEGM UB RAS" aimed at studying the causes and mechanisms of the immunological non-response development. Promising directions for further research are also proposed.

*Keywords: HIV-infection, CD4<sup>+</sup> T-cells, highly active antiretroviral therapy, regeneration, immunological non-response.*

**Сведения об авторе**

*Сайдакова Евгения Владимировна*, доктор биологических наук, доцент, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева, д. 13; e-mail: [radimira@list.ru](mailto:radimira@list.ru)

*Материал поступил в редакцию 17.01.2023 г.*



## ПРИМЕНЕНИЕ КУЛЬТУР ХЛОРЕЛЛЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В БИОТЕХНОЛОГИИ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ \*

А.Д. Новокшонова, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*  
П.В. Храпцов, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*  
М.Б. Раев, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

### Для цитирования:

Новокшонова А.Д., Храпцов П.В., Раев М.Б. Применение культур хлореллы обыкновенной в биотехнологии и пищевой промышленности // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 32–42. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.4>

Микроводоросли, и в частности *Chlorella vulgaris*, на данный момент являются важнейшими инструментами современного технологического производства различных продуктов и товаров. За последние десятилетия область применения микроводорослей заметно расширилась и нет сомнений, что технологии на основе микроводорослей будут развиваться и находить новые применения. Создание возобновляемого топливного сырья из *C. vulgaris*, по оценкам экспертов, поможет преодолеть экономические и технические проблемы, связанные с сокращением запасов нефти. Большое пространство для улучшения данных технологий остаётся в области поиска новых способов стимулирования как физических (освещение, магнитные поля, температура), так и химических (фитогормоны, удобрения, малые органические молекулы). В этой обзорной работе будут рассмотрены перспективы применения *C. vulgaris* в промышленности, а также способы увеличения ее биомассы и содержания полезных метаболитов.

**Ключевые слова:** хлорелла, биотопливо, фитогормоны, метаболиты.

### Введение

Зеленая одноклеточная водоросль *Chlorella vulgaris* имеет серьезный потенциал промышленного применения, который обусловлен ее способностью к быстрому размножению и накоплению биомассы, содержащей широкий спектр биологически активных соединений: белков, полиненасыщенных жирных кислот, пигментов, витаминов, минералов и олигосахаридов [47]. Для увеличения продуктив-

ности *C. vulgaris* используются различные стимуляторы, которыми служат как химические соединения (например, фитогормоны), так и физические факторы (магнитные поля, освещение и т.д.) [12, 33]. Биостимуляторы позволяют предприятиям, использующим *C. vulgaris*, повысить практический выход представляющих интерес молекул. Особую актуальность создание новых стимуляторов продуктивности *C. vulgaris*

\* Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации темы № 122010800029-1.

имеет для производителей биодизеля, удобрений, биогаза, инструментов для очистки сточных вод, восстановления почв [17, 31, 47]. Изготовители продуктов питания, кормов, косметики, товаров для здоровья, также заинтересованы в повышении продуктивности *C. Vulgaris* [1]. Промышленные предприятия, культивирующие *C. vulgaris* в крупных масштабах, испытывают потребность в эффективных способах усиления роста и продуктивности *C. Vulgaris* [14, 47, 49].

В этой обзорной работе рассмотрены перспективы применения *C. vulgaris* в промышленности, а также способы увеличения ее биомассы и содержания полезных метаболитов.

### Общая характеристика *Chlorella vulgaris*

*C. vulgaris* является широко используемым экспериментальным объектом с хорошо изученными морфологическими и физиологическими признаками [3]. В 1890 году Мартинус Бейеринк описал род *Chlorella*, типовым видом которого стала *C. vulgaris*. Определение *C. vulgaris* основывается на секвенировании последовательности 18S рРНК и участка ITS2 ДНК [6, 23].

*C. vulgaris* – космополитический вид, обитающий как в наземной среде, так и водной – пресных и солёных водах. *C. vulgaris* имеет короткий цикл роста, что

делает ее идеальным объектом для биохимических исследований. Помимо этого, ее можно использовать для непосредственного наблюдения реакции новых фитогормонов и химических веществ на клеточном уровне, поскольку восприятие сигнальной молекулы и биохимического ответа происходит в одной и той же клетке в контролируемых условиях [3].

Клетки *C. vulgaris* имеют овально-сферическую форму размером 2–10 мкм, без жгутиков. Органеллы *C. vulgaris* аналогичны органеллам растительных клеток (рис.). В сухой массе клеток содержится до 60% белков, 10–15% углеводов, 12–15% липидов. В онтогенезе клетки накапливают ненасыщенные жирные кислоты, каротиноиды, витамины и различные вторичные метаболиты. Клетка *C. vulgaris* синтезирует большое количество запасных соединений в стрессовых условиях, в частности, при высокой освещенности [6, 22].

*C. vulgaris* – фотоавтотроф. Это значит, что она способна получать энергию для своего развития как посредством фотосинтеза (автотрофный способ), так и в процессе дыхания (гетеротрофный способ), *C. vulgaris* может также объединять два способа получения энергии (миксотрофный способ) [31].

Важной особенностью одноклеточных водорослей и *C. vulgaris* как объекта исследования является способность к

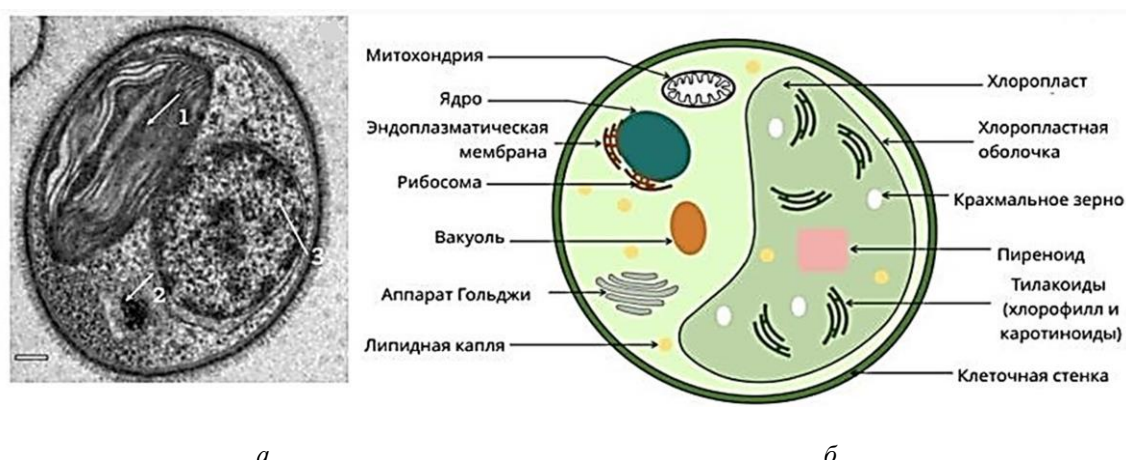


Рис. Изображение *C. Vulgaris*, полученное в просвечивающем электронном микроскопе; длина шкалы 200 нм; 1-хлоропласт, 2-митохондрия, 3-ядро [41] – а; Схема типичного строения клетки *C. vulgaris* [27] – б

синхронизации. При создании определенных условий деление и развитие клеток *C. vulgaris* может происходить с одинаковой периодичностью. Такая *C. vulgaris* представляет собой синхронную культуру [24, 39]. Использование синхронизированных культур уменьшает ошибки в исследовании и позволяет отслеживать влияние исследуемых веществ на различные метаболические пути.

Размножение *C. vulgaris* быстрое – клетки делятся каждые 18–24 ч. Тип размножения – бесполое (агамное) неподвижное. У хлореллы были обнаружены гены, кодирующие мейоз, следовательно, при определённых условиях может происходить половое размножения [23]. Деление клеток состоит из нескольких шагов, которые включают в себя увеличение размеров клеток, формирование внутренней клеточной стенки дочерней клетки, деление хлоропласта на две части, а затем на четыре части, образование и созревание дочерней клеточной стенки [9]. Внутри клетки матери образуются четыре дочерние клетки, имеющие собственную клеточную стенку. После созревания стенка материнской клетки разрушается, высвобождая дочерние клетки и остатки внутренних питательных веществ, которые могут использоваться дочерними клетками.

Клеточные стенки материнской клетки (аутоспорангий) и дочерних клеток (аутоспоры) подвергаются быстрому изменению во время деления. Толщина аутоспор варьируется от нескольких до 20–25 нм. Таким образом, дочерние клетки несут самые тонкие клеточные стенки, в то время как у зрелых клеток самая толстая клеточная стенка. При неблагоприятных условиях *C. vulgaris* образует неподвижную спору с толстой клеточной оболочкой – апланоспору [23, 31].

### Практическое значение *Chlorella vulgaris*

Области применения *C. vulgaris* весьма разнообразны и обширны, её можно использовать в качестве источника альтернативной пищи, корма для животных, биото-

плива, удобрений, косметики, нутрицевтиков и в фармацевтических целях. Ниже подробно рассмотрены основные перспективные области применения *C. vulgaris* и специфические требования, которые предъявляет эта область деятельности к составу биомассы водорослей (табл.).

**Пищевая промышленность.** *C. vulgaris* является источником незаменимых омега-3 жирных кислот, таких как эйкозапентаеновая кислота и докозагексаеновая кислота, которые используются в биотехнологии для замены большого количества используемых животных жиров. Докозагексаеновая кислота, в частности, очень важна для правильного развития тканей головного мозга и сетчатки глаза млекопитающих и позвоночных [40, 45]. Переработанная в пасту или сублимированные кубики *C. vulgaris* используется как добавка в рыбы корма [47].

В последнее время ученые активно изучают полисахариды микроводорослей и их производные на предмет потенциального действия в качестве нового источника пребиотиков, которые будут использоваться для функциональных пищевых продуктов [17]. Функциональные продукты – это целенаправленно разработанные и полученные ингредиенты (часть продукта), оказывающие определенное воздействие на здоровье человека и применяющиеся для профилактики различных заболеваний. Перспективным источником функциональных пищевых продуктов и профилактических препаратов являются микроводоросли, в частности культуры *C. vulgaris*, в связи с высоким содержанием в них жирных кислот, олиго- и полисахаридов, различных белков, веществ с антиоксидантной активностью [16, 17].

**Медицина.** Имеет место медицинское применение экстрагированных из *C. vulgaris* астаксантина для повышения концентрации гемоглобина, β-каротина для снижения уровня сахара в крови, а также глюкана, который может использоваться как гепатопротекторный агент при недоедании [47]. *C. vulgaris* обладает мощными бактерицидными свойствами

Вещества, содержащиеся в биомассе *Chlorella sp.*, имеющие хозяйственное значение

ПЕРВИЧНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ		
Группа	Представитель	Использование
Хлорофиллы	Хлорофилл-а	В качестве природных антиоксидантов
	Хлорофилл-в	
Белки и аминокислоты	Микоспориноподобные аминокислоты	Исследуются в качестве противораковых препаратов
Жирные кислоты	Линоленовая, Пальмитолеиновая	Противовоспалительные средства
Сахара	$\beta$ -1,3-глюкан	Иммуностимуляторы, снижающие количество свободных радикалов и уровень холестерина в крови
	Рамноза	Для переработки в биотопливо, производства высокосульфатированных полисахаридов (противовирусные препараты)
	Арабиноза	
	Ксилоза	
	Манноза	
Витамины	Тиамин (В1)	В препаратах для формирования и регенерации клеток крови
	Цианокобаламин (В12)	
	Пиридоксин (В6)	
	Биотин (В7)	
	Ретинол (А)	В косметологии как средство против акне
ВТОРИЧНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ		
Группа	Представитель	Использование
Алкалоиды		Для удаления в пищевых добавках свободных радикалов
Флавоноиды		
Жирные кислоты	Олеиновая	В ароматизаторах, эмульгаторах, производстве бумаги
Изопреноиды	Стерол	В качестве природных антиоксидантов
	Фитол	
Каротиноиды (ксантофиллы и каротины)	Астаксантин	Как компонент кормов рыб (лосося)
	Лютеин	В фармацевтике, косметической и пищевой промышленности
	$\alpha$ -каротин	
	$\beta$ -каротин	

благодаря содержанию в ней антибиотика хлореллина и противомикробных соединений [1]. Этот антибиотик оказался эффективным против стрептококков, стафилококков, кишечной палочки и возбудителя туберкулеза [13].

**Косметология.** В косметических средствах, направленных на поддержание регенерации тканей и борьбу с морщинами на коже, используются фенольные кислоты *C. vulgaris*, такие как галловая, кофейная, салициловая, пара-кумаровая и феруловая. Эффекта разглаживания кожи можно достичь за счет добавления синтезируемого *C. vulgaris* коллагена в косметические продукты [47].

**Энергетика.** *C. vulgaris* рассматривается в качестве сырья для производства биодизеля благодаря высокому содержанию в ней липидов и высокой продуктивности биомассы [11, 47]. Для преобразования биомассы *C. vulgaris* в энергию используются термохимические методы, а именно процессы этерификации, пиролиза и газификации. Современные исследования направлены на повышение практического выхода и улучшение качества твердых (уголь), жидких (бионефть) и газообразных (синтез-газ) продуктов, получаемых при термохимической обработке биомассы *C. Vulgaris* [11].

Для производства топлива из микроводорослей используются также процессы переэтерификации молекул липидов биомассы в алкиловые эфиры жирных кислот. В процессе экстрактивной переэтерификации биодизель производится из экстрагированного масла микроводорослей. Хотя микроводоросли обладают самым высоким потенциалом в качестве альтернативного возобновляемого сырья, проблема сокращения затрат на производство биотоплива по-прежнему остается [25].

**Химическое производство.** Активно развивается направление создания биопластика путем преобразования биомассы водорослей при ферментативной обработке и дальнейшей пластификации. Высокое содержание в *Chlorella* sp. углеводов (более 60% сухого веса) позволяет перерабатывать её биомассу в биопластик, состоящий из полимолочной кислоты. Белки, производимые *Chlorella* sp., считаются альтернативным сырьем для производства пластмасс на биологической основе [21, 47].

**Биоремедиация.** *C. vulgaris* способна извлекать неорганический фосфор, азот и углекислый газ из окружающей среды при автотрофном метаболизме. Эту особенность используют для удаления из сточных вод азота и фосфора, что предотвращает развитие патогенных организмов. *C. vulgaris* удаляет 72% азота и 28% фосфора в воде с бытовыми отходами [31].

Разрабатываются технологии использования *Chlorella* sp. в биоремедиации промышленных отходов: токсичных газов, тяжелых металлов, нефтезагрязнителей, красителей в сточных водах. Создаются методы удаления оксида азота и диоксида серы из дымовых газов с использованием *Chlorella* sp.

Экспериментальные данные показывают, что разработанные методы предотвращают выход в атмосферу около 70% оксида азота и около 50% диоксида серы [31, 47].

**Сельское хозяйство.** *C. vulgaris* активно используется как биоудобрение для улучшения химических и биологических

свойств почвы, восстановления её плодородия и стимулирования роста растений. Биоудобрения на основе *C. vulgaris* являются важными компонентами регулируемого процесса минерализации. Такие биоудобрения могут заменить или дополнить используемые в настоящее время дорогостоящие и энергоемкие химические удобрения. Биоудобрения на основе *C. vulgaris* рентабельны и экологически безопасны [15]. Развиваются методы применения сухой *C. vulgaris* как почвенной добавки, влияющей на рост целевых растений. Так, например, при использовании сухой *C. vulgaris* при выращивании кукурузы, наблюдается значительное увеличение количества питательных веществ, потребляемых корнями, увеличение объема корней и образования хлорофилла [47].

#### Методы стимулирования роста *Chlorella vulgaris*

Средняя продуктивность биомассы одноклеточных водорослей, о которой сообщается в литературе, для обычной промышленной системы открытых прудов находится в диапазоне 8,5–21 г/м<sup>2</sup> за один день. Это соответствует приблизительно от 18 до 36 т/га сухого сырья в год. Увеличение продуктивности водорослей с 21 г/м<sup>2</sup> за один день до более высокого уровня может снизить стоимость производства биомассы и повысить экономическую эффективность производства биомассы из водорослей [5]. Это, в свою очередь, откроет новые возможности использования микроводорослей, и в частности *C. vulgaris* для создания предприятий с высокой прибылью, а также позволит удешевить разрабатываемые технологии получения биотоплива.

Растительные гормоны и их синтетические аналоги рассматриваются как потенциальные инструменты для повышения скорости роста и производства биомассы водорослей.

**Ауксины** – это группа растительных гормонов. Природные ауксины являются производными индола: индол-3-уксусная кислота, индол-3-масляная кислота, индол-3-пропионовая кислота и др.

Считалось, что ауксины синтезируются в основном в быстрорастущих частях стеблевых растений и вызывают удлинение клеток побегов [37, 43]. Однако некоторые ауксины были обнаружены у цианобактерий с помощью иммуноферментного анализа. Затем были обнаружены индол-3-уксусная кислота, индол-3-масляная кислота, индол-3-пропионовая кислота и индол-3-ацетамид у 46 видов микроводорослей, относящихся к отряду *Chlorophyta* [37]. Так же были охарактеризованы эндогенные ауксины *Chlorella* sp. при культивировании в различных условиях [32, 43].

Было замечено, что добавление в культуру цианобактерий предшественников ауксинов способствовало накоплению индол-3-уксусной кислоты в этих клетках [28, 43]. Добавление в культуральную среду экзогенных ауксинов способствует росту одноклеточных микроводорослей, в том числе *C. vulgaris* [28].

Индол-3-уксусная кислота является наиболее изучаемым и широко используемым ауксином, показано, что при добавлении её в культуру *C. vulgaris* в концентрации 1 мг/л повышается продуцирование линоленовой кислоты на 12,67%, эйкозапентаеновой кислоты 23,25% и докозагексаеновой кислоты на 26,11% по сравнению с контролем [40]. Индол-3-уксусная кислота в концентрации  $10^{-5}$  М усиливала рост *Scenedesmus obliquus* в 1,9 раза по сравнению с контролем [48]. При недостатке азота в культуральной среде индол-3-уксусная кислота способствовала увеличению роста микроводорослей [41].

Индол-3-уксусная кислота, вырабатываемая клетками микроводорослей, при действии стрессовых агентов способна ослаблять ингибирующее действие стрессовых факторов, подавляющих рост культур микроводорослей [27, 42]. Индол-3-уксусная кислота усиливала способность *C. vulgaris* фиксировать  $\text{CO}_2$  в условиях ртутного стресса, она также способна индуцировать биосинтез жирных кислот и стимулировать выработку водорастворимых белков, моносахаридов и хлорофил-

лов в клетках *C. pyrenoidosa* и *C. vulgaris* [21, 27]. При добавлении в культуру *C. vulgaris* индол-3-уксусной кислоты в концентрации 0,1 мкМ наблюдалось значительное увеличение содержания белка после культивирования 48 ч [4, 36].

Индол-3-масляная кислота вырабатывается в клетках микроводорослей в ответ на различные стрессы, но не оказывает влияние на содержание липидов в клетке [29, 42]. В концентрации 10 и 100 мкМ индол-3-масляная кислота увеличивала накопление биомассы у сине-зелёных водорослей рода *Nostoc* sp. Низкие концентрации (0,01; 0,1; 1 мкМ) оказывали стимулирующее действие на накопление хлорофилла и ряда каротиноидов [30]. Внесение индол-3-масляной кислоты в питательные среды *C. pyrenoidosa* и *C. vulgaris* увеличивало содержание хлорофилла, каротиноидов, альдогексоз и водорастворимых белков [4, 36].

Индол-3-пропионовая кислота может оказывать существенное влияние на продукцию липидов микроводорослями и рост клеток [28]. Исследования показывают, что индол-3-пропионовая кислота наравне с индол-3-уксусной кислотой оказывает наибольшее влияние на рост клеток и продукцию липидов микроводорослями [28]. При добавлении индол-3-пропионовой кислоты к культурам *C. vulgaris* и *S. obliquus* наблюдалось улучшение продукции липидов [4, 28].

Установлено, что нафтилуксусная кислота повышает концентрацию индол-3-уксусной кислоты в клетках микроводорослей [28, 35]. Ранее нафтилуксусная кислота была идентифицирована как более эффективный стимулятор по сравнению с природными ауксинами [20, 21]. Однако существуют работы, в которых показано, что различные концентрации нафтилуксусной кислоты не увеличивают биомассу водорослей или содержание липидов; это можно объяснить наличием токсинов или ингибиторов, высвобождаемых клетками водорослей в среду с нафтилуксусной кислотой и её блокированием [28, 29].

Природные и синтетические ауксины снижают накопление активных форм кислорода, таких как перекись водорода, в клетках *C. vulgaris* после 48 ч культивирования [4, 36]. Активные формы кислорода накапливаются при световых, тепловых, химических стрессах, при этом повреждая генетический материал и различные структуры клеток [44].

Таким образом, ауксины обладают стимулирующим эффектом на продуцирование *C. vulgaris* жизненно важных для неё первичных метаболитов, таких как пигменты, жирные кислоты и полисахариды. Выявлен стимулирующий эффект ауксинов на содержание липидов, липидную продуктивность и скорость роста [35].

**Брассиностероиды** являются гидроксильрованными производными холестерина. Брассиностероиды играют важную роль в биосинтезе этилена, гиперполяризации мембран, увеличении синтеза ДНК, РНК и белков, повышении активности инвертазы, стимуляции фотосинтетической активности и изменение баланса других эндогенных фитогормонов [3, 4, 8]. Брассиностероиды могут минимизировать ингибирующее действие теплового стресса на культуры *C. vulgaris*, запуская в их клетках выработку этилена и абсцизовой кислоты [4, 28].

Показано синергическое влияние брассиностероидов и природных ауксинов на культуры *C. vulgaris*. Одновременное добавление брассиностероидов и ауксинов в питательные среды способствовало росту водорослей и накоплению в них метаболитов, причём содержание метаболитов было намного больше в сравнении с добавлением в среду только ауксина или брассиностероида [4].

**Цитокинины (ЦК)** – производные аденина и аденозина [2]. В тканях растений преобладающей формой цитокининов является зеатин, он может существовать в цис- или транс-конфигурации. Транс-зеатин служит наиболее активной и широко распространенной изоформой [19, 46]. Цитокинины играют роль во многих физиологических процессах рас-

тений, включая стимуляцию клеточного деления, дифференцировки и роста, дифференцировки хлоропластов [34].

Было обнаружено, что цитокинины играют ключевую роль в биологических процессах микроводорослей, включая индукцию клеточного деления, стимуляцию процессов роста и усиление фотосинтетической активности. В неблагоприятных условиях цитокинины микроводорослей оказывают защитное действие на физиологическую активность, особенно на фотосинтез [38].

Экзогенные цитокинины могут защищать функциональные белки и системы фотосинтеза и значительно снижают повреждение тяжелыми металлами *C. vulgaris* и *Acutodesmus obliquus*. Когда клетки водорослей подвергаются стрессу кадмием, медью или свинцом, цитокинины также уменьшают токсичность тяжелых металлов, ингибируя образование активных форм кислорода [44].

**Гиббереллины** были обнаружены при изучении грибных аскомицетов *Gibberella fujikuroi*, паразитирующих на растениях риса [18].

Большинство гиббереллинов представляют собой кислоты, обозначаемые аббревиатурой ГК (GA), за которой следует число, соответствующее порядку открытия гиббереллина. Наиболее активными формами являются GA1, GA3, GA4, GA5, GA6 и GA7. Установлено, что гиббереллины в основном участвуют в удлинении и расширении клеток, но не в их делении [38].

Функции гиббереллинов микроводорослей физиологически сходны с функциями высших растений. Добавленные в среду экзогенные гиббереллины значительно сокращают лаг-фазу и активируют рост клеток в лаг-фазе. Было высказано предположение, что GA3 положительно влияет на рост и повышает адаптивную способность к неблагоприятным условиям окружающей среды. Гиббереллины 4, 25, 8 и 15 стимулируют накопление пигментов и белков, снижают токсичность тяжелых металлов в культуре микроводорослей [18].

Добавление гиббереллина к культурам *C. vulgaris* снижает ингибирующее действие кадмия и свинца за счет активации накопления белка, фотосинтетических пигментов и моносахаридов, имеющих антиоксидантную активность [44].

Таким образом, основные используемые растительные гормоны и их синтетические аналоги активно влияют на накопление первичных метаболитов, рост и развитие клетки, адаптацию к стрессовым условиям и окружающей среде. Но пока среди фитогормонов не найдено стимуляторов, значительно повышающих синтез вторичных метаболитов: антибиотиков, пигментов, флавоноидов, алколоидов.

Помимо растительных гормонов исследуются модификации условий культивирования за счёт использования физических факторов, а именно магнитных полей, освещения и электрического стимулирования.

**Статические магнитные поля** влияют на метаболизм некоторых микроорганизмов, есть сообщения о том, что они могут ускорять рост. Недавно было предложено использование данного метода стимулирования для увеличения биомассы микроводорослей и повышения выхода ценных биомолекул, таких как полисахариды [10, 12].

При воздействии статических магнитных полей на культуры *C. fusca* и *C. vulgaris* увеличивается содержание полисахаридов в клетке. Использование статических магнитных полей с сочетанием различных стрессов, например азотным голоданием, может усиливать накопление крахмала в клетках *C. vulgaris* и *C. fusca*, что важно для использования данных водорослей в качестве сырья при производстве биоэтанола [12].

**Освещение** является важным условием культивирования микроводорослей, которое влияет на продуктивность фотосинтеза. В различных исследованиях упоминается увеличение выхода микроводорослей, а также сокращение времени культивирования при использовании в

освещении длин волн, соответствующих спектру поглощения хлорофиллов водорослей. Красный (600–700 нм) и синий (400–500 нм) свет стимулируют развитие микроводорослей, причем скорость роста и содержание липидов изменяются при различных интенсивностях света [33, 26].

Искусственные источники освещения позволяют управлять спектральной структурой света, что позволяет выбирать наиболее эффективные условия освещения при культивировании. В этом случае появляется возможность получить высокие показатели биосинтеза ценных веществ, входящих в состав *C. vulgaris*, а также повысить рост культуры [33].

**Электрическая стимуляция** может использоваться для быстрой индукции накопления триацилглицеринов и полиненасыщенных жирных кислот у *Chlorella* sp. Установлено, что при прикладывании катодного тока 31 мА (напряжение: 4 В) к клеткам микроводорослей в течение 4 ч содержание триацилглицеринов в электрообработанных клетках может повышаться в 2,1 раза по сравнению с необработанным контролем. Содержание полиненасыщенных линолевой и линоленовой кислот в электрообработанных клетках также было на 36 и 57% выше, чем в необработанных, соответственно. Циклическая вольтамперометрия и различные биохимические анализы показывают, что электростимулирование приводит к образованию триацилглицеринов и жирных кислот посредством биосинтеза жирных кислот и метаболической трансформации в организме [7].

Физическое стимулирование в большинстве случаев способствует увеличению содержания полисахаридов и жирных кислот в биомассе. Однако использование физических методов стимулирования весьма ограничено объемами культивирования. Данные методы наиболее эффективны при культивировании микроводорослей в биореакторах и не подходят для культивирования в больших открытых системах.



Библиографический список

1. *Abdul Fattah S., Nazlina Haiza M.Y.* Unveiling antimicrobial activity of microalgae *Chlorella sorokiniana* (UKM2), *Chlorella* sp. (UKM8) and *Scenedesmus* sp. (UKM9) // *Saudi journal of biological sciences*. – 2022. – Vol. 29. – № 2. – P. 1043–1052.
2. *Amasino R.* Kinetin arrives: the 50<sup>th</sup> anniversary of a new plant hormone // *Plant physiology*. – 2005. – Vol. 138. – № 3. – P. 1177–1184.
3. *Bajguz A., Hayat S.* Effects of brassinosteroids on plant responses to environmental stresses // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2009. – Vol. 47. – № 1. – P. 1–8.
4. *Bajguz A., Piotrowska-Niczyporuk A.* Synergistic effect of auxins and brassinosteroids on the growth and regulation of metabolite content in the green alga *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2013. – Vol. 71. – P. 290–297.
5. *Benemann J.R., Oswald W.J.* Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of carbon dioxide to biomass // *Pittsburgh Energy Technology Center*. – 1996. – Vol. 1. – P. 1–11.
6. *Champenois J.M.* Review of the taxonomic revision of *Chlorella* and consequences for its food uses in Europe // *Journal of Applied Phycology*. – 2015. – Vol. 27. – № 5. – P. 1845–1851.
7. *Choi S., Lee S.Y., Lee J., Cho J.M., Jin-Suk Lee.* Rapid induction of edible lipids in *Chlorella* by mild electric stimulation // *Bioresource Technology*. – 2019. – Vol. 292. – P. 121–950.
8. *Choudhary S.P., Yu Y.Q., Yamaguchi-Shinozaki, Shinozaki K.* Benefits of brassinosteroid cross talk // *Trends in Plant Science*. – 2012. – Vol. 10. – № 10. – P. 594–605.
9. *Coronado-Reyes J.A., Salazar-Torres J., Juárez-Campos B., González Hernández J.C.* *Chlorella vulgaris*, a microalgae important to be used in Biotechnology: a review // *Food Science and Technology*. – 2020. – Vol. 42. – P. 320–370.
10. *Costa S.S., Peres B.P., Machado B.R., Costa J.A.V., Santos L.O.* Increased lipid synthesis in the culture of *Chlorella homosphaera* with magnetic fields application // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 315. – P. 123–880.
11. *Das P., Chandramohan V.P., Mathimani T.* Recent advances in thermochemical methods for the conversion of algal biomass to energy // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 766. – P. 144–608.
12. *Deamici K.M., Cardias B.B., Costa J.A.V., Santos L.O.* Static magnetic fields in culture of *Chlorella fusca*: Bioeffects on growth and biomass composition // *Process Biochemistry*. – 2016. – Vol. 51. – № 7. – P. 912–916.
13. *Dineshkumar R., Rajendran N., Jayasingam P., Sampathkumar P.* Cultivation and chemical composition of microalgae *Chlorella vulgaris* and its antibacterial activity against human pathogens // *Journal of Aquaculture & Marine Biology*. – 2017. – Vol. 5. – P. 1–19.
14. *Dragone G.* Challenges and opportunities to increase economic feasibility and sustainability of mixotrophic cultivation of green microalgae of the genus *Chlorella* sp. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 160. – P. 112–284.
15. *Esraa E.A., Aioub A.A., Elesawy A.E.* Algae as bio-fertilizers: between current situation and future prospective // *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2022. – Vol. 29. – № 5. – P. 3083–3096.
16. *Ferrazzano G.F., Papa C., Pollio A., Ingenito A., Sangianantoni G., Cantile T.* Cyanobacteria and microalgae as sources of functional foods to improve human general and oral health // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25. – № 21. – P. 51–64.
17. *Gouda M., Tadda M.A., Zhao Y.* Microalgae bioactive carbohydrates as a novel sustainable and eco-friendly source of prebiotics: Emerging health functionality and recent technologies for extraction and detection // *Frontiers in Nutrition*. – 2022. – Vol. 9. – P. 692–806.
18. *Han X., Zeng H., Bartocci P., Fantozzi F., Yan Y.* Phytohormones and effects on growth and metabolites of microalgae: a review // *Fermentation*. – 2018. – Vol. 4. – № 2. – P. 25–25.
19. *Hirose N., Takei K., Kuroha T., Kamada-Nobusada T., Hayashi H., Sakakibara H.* Regulation of cytokinin biosynthesis, compartmentalization and translocation // *Journal of Experimental Botany*. – 2007. – Vol. 59. – № 1. – P. 75–83.47.
20. *Hunt R.W., Chinnasamy S., Das K.C.* Recent advances in thermochemical methods for the conversion of algal biomass to energy // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 766. – P. 144–160.
21. *Hunt R.W., Chinnasamy S., Das K.C.* The effect of naphthalene-acetic acid on biomass productivity and chlorophyll content of green algae, Coccolithophore, Diatom, and Cyanobacterium cultures // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 164. – P. 1350–1365.
22. *Huss V.A., Carola F.* Biochemical taxonomy and molecular phylogeny of the genus *Chlorella* sensu lato (Chlorophyta) // *Journal of Phycology*. – 1999. – Vol. 35. – № 3. – P. 587–598.
23. *Ibrahim I., Elbialy Z.* A review: Importance of *Chlorella* sp. and different applications // *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. – 2020. – Vol. 65. – № 1. – P. 16–16.

24. Iversen P.W., Eastwood B.J., Sittampalam G.S., Cox K.L. A comparison of assay performance measures in screening assays: signal window, Z'-factor, and assay variability ratio // *SLAS Discovery*. – 2006. – Vol. 11. – № 3. – P. 247–252.
25. Karpagam R., Jawaharraj K., Gnanam R. Review on integrated biofuel production from microalgal biomass through the outset of transesterification route: a cascade approach for sustainable bioenergy // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 766. – P. 144–236.
26. Khalili A., Najafpour G.D., Amini G. Influence of nutrients and LED light intensities on biomass production of microalgae *Chlorella vulgaris* // *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – № 2. – P. 284–290.
27. Kong W., Kong J., Lyu H. Application of indole-3-acetic acid in microalgae cultivation to improve the feasibility of simultaneously purifying wastewater, fixing CO<sub>2</sub> and producing fatty acids under Hg stress // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 358. – P. 28–132.
28. Liu J., Qiu W. Stimulatory effect of auxins on the growth and lipid productivity of *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus quadricauda* // *Algal Research*. – 2016. – Vol. 18. – P. 273–280.
29. Liu J., Song Y. Optimization of growth conditions toward two-stage cultivation for lipid production of *Chlorella vulgaris* // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2015. – Vol. 34. – № 6. – P. 1801–1807.
30. Mansouri H., Talebizadeh R. Effects of indole-3-butyric acid on growth, pigments and UV-screening compounds in *Nostoc linckia* // *Phycological Research*. – 2017. – Vol. 65. – № 3. – P. 212–216.
31. Masojídek J., Torzillo G. Mass cultivation of freshwater microalgae // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. – 2014. – P. 2226–2235.
32. Mateusz M., Stéphanie R. The role of auxin in Cell wall expansion // *International journal of molecular sciences*. – 2018. – Vol. 19. – № 4. – P. 951–951.
33. Metsoviti M.N., Papapolymerou G. Effect of light intensity and quality on growth rate and composition of *Chlorella vulgaris* // *Plants (Basel, Switzerland)*. – 2019. – Vol. 9. – №. 1. – P. 31–31.
34. Mok D.W., Mok M.C. Cytokinin metabolism and action // *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*. – 2001. – Vol. 52. – № 1. – P. 89–118.
35. Parsaeimehr A., Mancera-Andrade E.I., Robledo-Padilla F., Iqbal H.M., Parra-Saldivar R. A chemical approach to manipulate the algal growth, lipid content and high-value alpha-linolenic acid for biodiesel production // *Algal Research*. – 2017. – Vol. 26. – P. 312–322.
36. Piotrowska-Niczyporuk A., Bajguz A. The effect of natural and synthetic auxins on the growth, metabolite content and antioxidant response of green alga *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) // *Plant Growth Regulation*. – 2014. – Vol. 73. – № 1. – P. 57–66.
37. Romanenko E.A., Kosakovskaya I.V. Phytohormones of microalgae: biological role and involvement in the regulation of physiological processes, Pt I. Auxins, Abscisic Acid, Ethylene // *International Journal on Algae*. – 2015. – Vol. 17. – № 3. – P. 275–289.
38. Romanenko K.O., Kosakovskaya I.V., Romanenko P.O. Phytohormones of microalgae: Biological role and involvement in the regulation of physiological processes, Pt II. Cytokinins and Gibberellins // *International Journal on Algae*. – 2016. – Vol. 18. – P. 179–201.
39. Sandberg M., Määttänen A., Peltonen J., Vuorela P.M., Fallarero A. Automating a 96-well microtitre plate model for *Staphylococcus aureus* biofilms: an approach to screening of natural antimicrobial compounds // *International Journal of Antimicrobial Agents*. – 2008. – Vol. 32. – № 3. – P. 233–240.
40. Sivaramkrishnan R., Incharoensakdi A. Plant hormone induced enrichment of *Chlorella* sp. omega-3 fatty acids // *Biotechnology for biofuels*. – 2020. – Vol. 13. – № 1. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1647-9>.
41. Stirk W.A., Tarkowská D., Turečová V., Strnad M. Abscisic acid, gibberellins and brassinosteroids in Kelpak, a commercial seaweed extract made from *Ecklonia maxima* // *Journal of Applied Phycology*. – 2014. – Vol. 26. – № 1. – P. 561–567.
42. Subhash V., Rohit M.V., Devi M.P., Swamy Y.V. Temperature induced stress influence on biodiesel productivity during mixotrophic microalgae cultivation with wastewater // *Bioresource Technology*. – 2014. – Vol. 169. – P. 789–793.
43. Thi C., Dang T. Characterization of endogenous auxins and gibberellins produced by *Chlorella sorokiniana* (TH01) under phototrophic and mixotrophic cultivation modes toward applications in microalgal biorefinery and crop research // *Journal of Chemistry*. – 2020. – Vol. 4. – P. 1–11.
44. Wang C., Qi M., Guo J., Zhou C., Yan X. The Active Phytohormone in Microalgae: The characteristics, efficient detection, and their adversity resistance Applications // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – № 1. – P. 46–46.
45. Wase N., Tu B., Allen J.W., Black P.N., DiRusso C.C. Identification and metabolite profiling of chemical activators of lipid accumulation in green algae // *Plant Physiology*. – 2017. – Vol. 174. – № 4. – P. 2146–2165.

46. Werner T., Schmölling T. Cytokinin action in plant development // Current Opinion in Plant Biology. – 2009. – Vol. 12. – № 5. – P. 527–538.
47. Wilson G. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing // Aquaculture. – 2020. – Vol. 528. – P. 562–735.
48. Wood E., Wingard L., Andersen R. Measuring growth rates in microalgal cultures // Algal Culturing Techniques. 2005.
49. Ziganshina E.E., Bulynina S.S., Ziganshin A.M. Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in a photobioreactor during the utilization of different forms of nitrogen at various temperatures // Plants. – 2022. – Vol. 11. – № 8. – P. 10–86.

## APPLICATION OF CHLORELLA VULGARIS CULTURES IN BIOTECHNOLOGY AND FOOD INDUSTRY

Novokshonova A.D.<sup>1</sup>, Khramtsov P.V.<sup>2</sup>, Rayev M.B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Perm State University

<sup>2</sup> Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS

---

### For citation:

Novokshonova A.D., Khramtsov P.V., Rayev M.B. Application of *Chlorella vulgaris* cultures in biotechnology and food industry // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 32–42. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.4>

---

Microalgae, in particular *Chlorella vulgaris*, are currently the most important tools for modern technological production of various products and goods. Over the past decades, the field of application of microalgae has significantly expanded and there is no doubt that microalgae-based technologies will develop and find new applications. The creation of renewable fuel feedstock from *Chlorella vulgaris* is estimated to help overcome the economic and technical problems associated with declining oil reserves. Much room for improvement of these technologies remains in the search for new ways to stimulate both physical (lighting, magnetic fields, temperature) and chemical (phytohormones, fertilizers, small organic molecules). This review paper will look into the prospects for industrial applications of *Chlorella vulgaris*, as well as ways to increase its biomass and beneficial metabolite content.

*Keywords: Chlorella, biodiesel, phytohormones, metabolites.*

### Сведения об авторах

Новокишоновна Анастасия Денисовна, студентка, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: anast218bio@gmail.com

Храмцов Павел Викторович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН–филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева, д. 13; e-mail: khramtsov Pavel@yandex.ru

Раев Михаил Борисович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: mraev@iegm.ru

*Материал поступил в редакцию 31.01.2023 г.*

## ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА \*

А.Б. Трапезникова, Горный институт УрО РАН

А.Г. Ярославцев, Горный институт УрО РАН

И.А. Санфиоров, Горный институт УрО РАН

Ю.И. Степанов, Горный институт УрО РАН

Т.В. Байбакова, Горный институт УрО РАН

---

### Для цитирования:

Трапезникова А.Б., Ярославцев А.Г., Санфиоров И.А., Степанов Ю.И., Байбакова Т.В. Геофизическое обоснование пород-коллекторов для закачки избыточных рассолов калийного производства // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 43–50. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.5>

---

Обосновывается комплекс геофизических исследований с целью выявления коллекторов в интервале соляно-мергельной толщи надсолевого комплекса Верхнекамского месторождения калийных солей для закачки отработанных рассолов. Выбор интервала закачки и локализация мест под бурение технологических скважин обосновывается комплексной интерпретацией данных геофизических исследований скважин (ГИС), малоуглубинной сейсморазведки и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Представлены примеры результатов разных геофизических методов, используемых для выделения аномалий, связанных с пластами коллекторами.

**Ключевые слова:** коллекторы, малоуглубинная сейсморазведка, Верхнекамское месторождение калийных солей, электроразведка, геофизические исследования скважин.

Добыча и переработка калийно-магниевых солей связаны с образованием значительного количества техногенных отходов, в том числе рассолов. Существует несколько методов утилизации техногенных рассолов: выпаривание, сброс в объекты поверхностной гидросферы и др. Поверхностная утилизация техногенных отходов оказывает негативное влияние на экологическую обстановку района проведения работ. Поэтому наиболее экологи-

ческим и перспективным является закачка (захоронение) техногенных рассолов в подземные коллекторы. Коллектором является горная порода, обладающая высокими фильтрационными свойствами: пустотным пространством (поры, трещины, каверны) и проницаемостью. Ввиду сложного геологического строения подсоляного комплекса Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) и высокой стоимости бурения таких глубин, наиболее пер-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000401-7).

спективным объектом подземного сброса техногенных рассолов является соляно-мергельная толща (СМТ) надсоляного комплекса ВКМС.

Для выявления коллекторов в интервале соляно-мергельной толщи надсолевого комплекса ВКМС в пределах исследуемого участка выполнен комплекс геофизических исследований, в частности: геофизические исследования в скважинах (ГИС), малоглубинная сейсморазведка и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ).

### Геофизические исследования скважин

В основу интерпретации выполненного комплекса исследований заложены физико-геологические модели, построенные с учетом ранее проведенных геолого-геофизических исследований, [2, 3, 4] – разведочное бурение с комплексом ГИС, наземные сейсморазведочные и электроразведочные исследования [5–6].

Первым этапом выявления потенциальных пород коллекторов является интерпретация данных геофизических исследований в скважинах (ГИС). Интерпретация ГИС выполнена в 5 скважинах, охарактеризованных наиболее полным комплексом исследований и находящиеся вблизи участков проведения наземных геофизических работ (сейсмо- и электроразведки). Комплекс ГИС включал в себя: боковой каротаж (БК); гамма-каротаж (ГК); нейтронный каротаж (W); акустический каротаж (АК), в том числе широкополосный (ФКД); кавернометрия (КВ). Перед интерпретацией материалов ГИС выполнялись процедуры обработки и нормировки данных (рис. 1, а–г). В результате интерпретации ГИС в исследуемых скважинах выделены интервалы ослабленных карбонатных пород, которые могут выступать потенциальными коллекторами, характеризующимися повышенной трещиноватостью и кавернозностью относительно вмещающих пород.

Пласты-коллекторы выделяются на диаграммах ГИС по общепринятым качественным признакам: низкие значения естественной гамма-активности по данным

ГК; наличие градиента электрического сопротивления, фиксируемое зондами бокового каротажного зондирования (БК); уменьшенный или близкий к номинальному диаметр скважины на кривой кавернометрии (КВ); повышенные показания водородосодержания (W) относительно вмещающих глинистых пород; пониженные значения интервальных времен продольной волны по данным акустического каротажа (АК); затухание фронта акустической волны и последующих фаз, с появлением гидроволны на фазо-корреляционной диаграмме (ФКД).

Выделение коллекторов контролируется количественными критериями, т.е. граничными значениями пористости и глинистости, принятыми по справочным материалам для трещиноватых типов карбонатных коллекторов. Пример выделения коллекторов в скважине Б по комплексу методов ГИС в отложениях соляно-мергельной толщи представлен на рис. 1, д. В разрезе СМТ по данным ГИС выделяется 9 интервалов с наиболее ослабленными породами, которые потенциально могут являться коллекторами.

Согласно результатам интерпретации ГИС установлено, что наиболее контрастными сейсмическими границами, на которых возможно формирование отражения внутри СМТ, являются кровли соляно-мергельной толщи, первого пласта-коллектора, относительно мощного реперного пласта гипсовой породы, а также подошва соляно-мергельной толщи (рис. 1, д). Потенциальный интервал исследований ограничивается кровлей первого пласта-коллектора и реперным гипсовым пластом, поскольку залегающие ниже пласты-коллекторы обладают менее выраженными коллекторскими свойствами и как следствие менее дифференцированы по акустическим и геоэлектрическим свойствам.

### Сейсморазведочные работы

Для межскважинного анализа геологического строения целевого интервала выполнены малоглубинные сейсморазведоч-

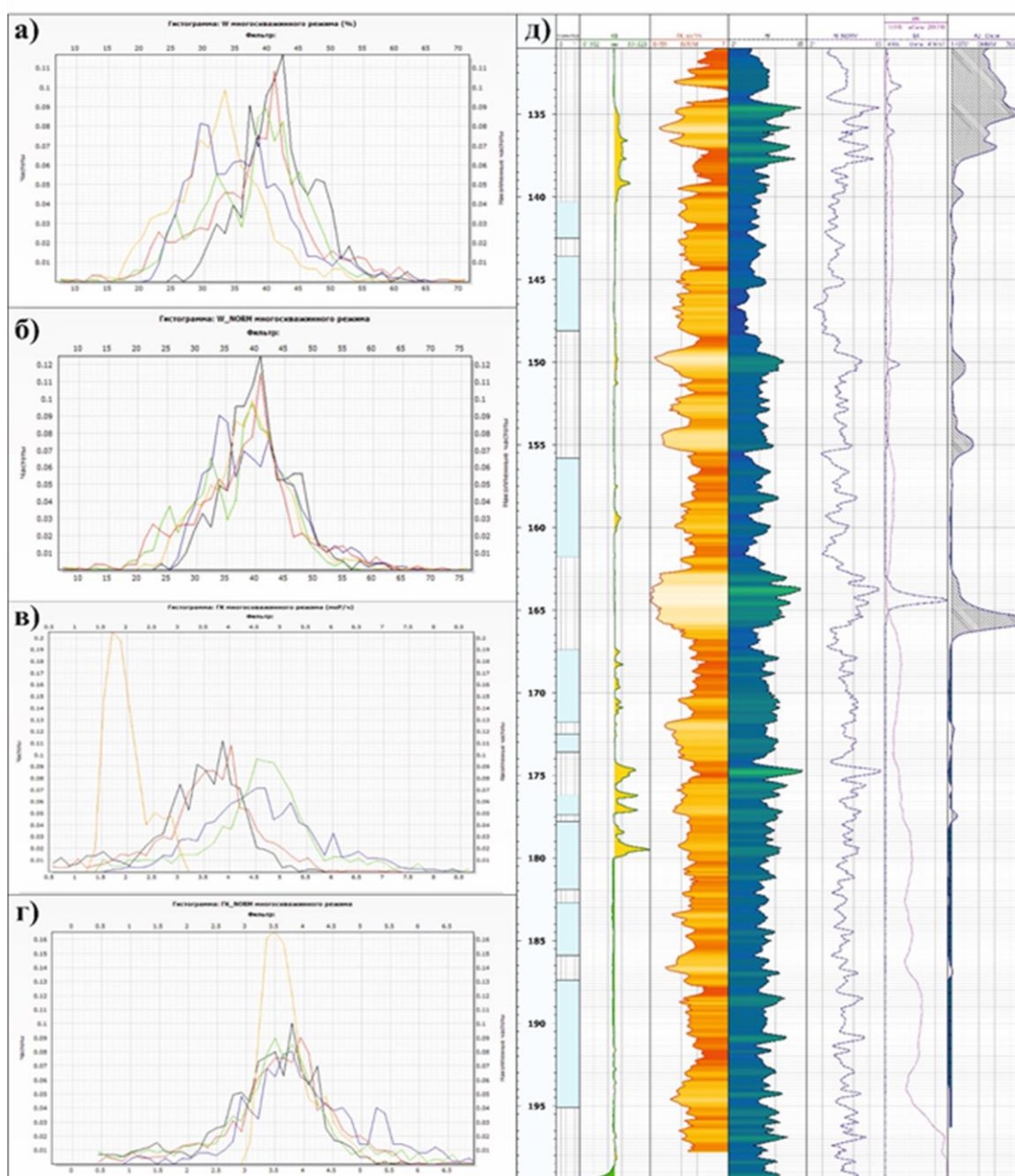


Рис. 1. Скважина Б пример выполнения процедуры нормировки и интерпретации:  
 а)  $W$  до нормировки; б)  $W$  после нормировки; в)  $GK$  до нормировки; г)  $GK$  после нормировки;  
 д) пример выделения пластов коллекторов

ные наблюдения высокого разрешения по трем профилям. Обоснование параметров систем наблюдений строится на общепринятых принципах невзрывной мало-глубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдений по методу общей глубинной точки [8]. При полевых экспериментах для изучения целевых глубин до 200-250 м выбрана система на-

блюдений со следующими параметрами: шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 4 м, шаг пунктов приема (ПП) – 4 м, максимальное удаление ПП-ПВ – 252 м, шаг дискретизации при записи данных – 200 мкс, источник возбуждения – импульсный [9].

В результате обработки сейсморазведочных данных получены суммарные временные разрезы (рис. 2, а), на которых выделяется ряд наиболее динамически выра-

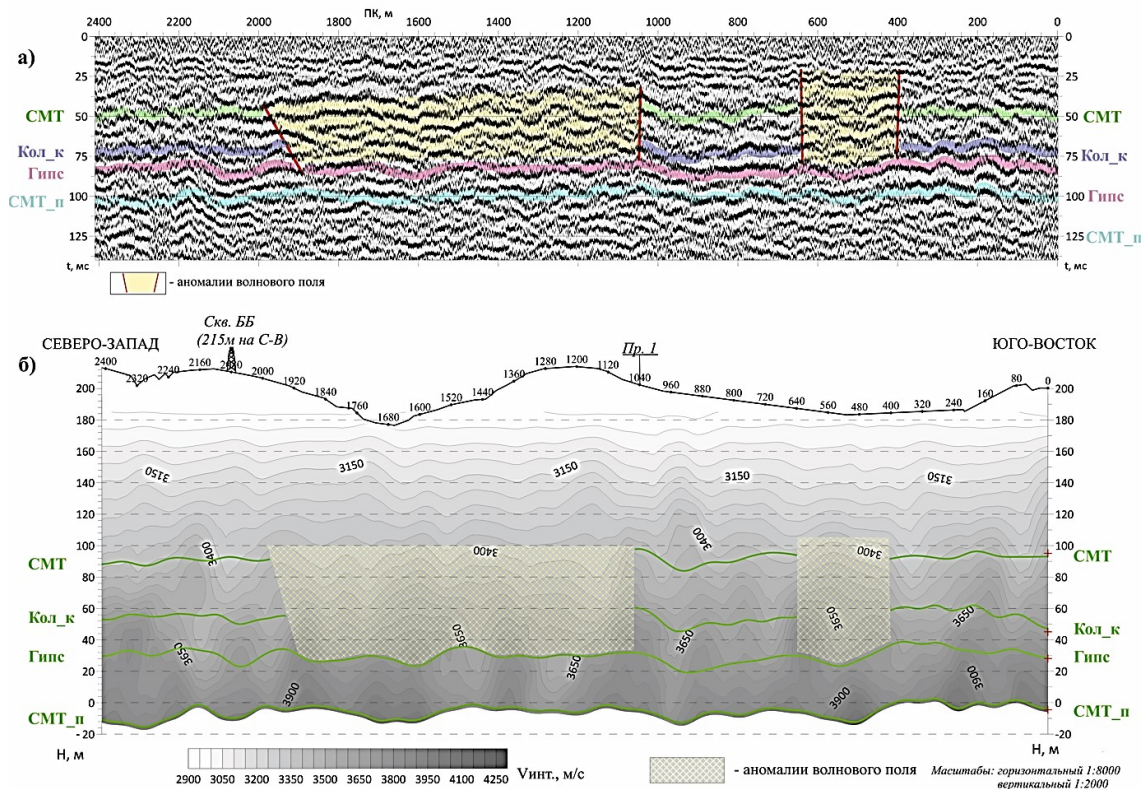


Рис. 2. Фрагмент разрезов цифровой обработки по профилю 2:  
 а) временной разрез ОГТ, б) сейсмогеологический разрез

женных осей синфазности целевых сейсмических отражающих горизонтов (ОГ), соответствующих сейсмогеологическим границам. Согласно прогнозу, основанному на результатах интерпретации данных ГИС и предыдущих исследований, выполненных на участке работ, установлены отражающие горизонты (рис. 2, б), соответствующие: кровле соляно-мергельной толщи (СМТ), кровле пласта-коллектора (Кол\_к), кровле реперного пласта гипсовой породы (Гипс), подошве соляно-мергельной толщи (СМТ\_П). Для полученных отражающих горизонтов построены карты площадного распределения основных структурно-физических параметров исследуемого интервала (рис. 3, а-е)

На структурных картах кровли коллектора (рис. 3, а) и гипсового репера (рис. 3, б) не наблюдается градиента в падении структурных отметок в отличие от поверхностей отражающих горизонтов (СМТ и СМТ\_П), залегающих выше и ниже данного интервала. Это отличие мо-

жет свидетельствовать о региональной невыдержанности лито-физических границ кровли коллектора и гипсового репера. Отчасти это же подтверждается распределением по площади упругих характеристик в интервале коллектора (ОГ Кол\_к – ОГ Гипс) (рис. 3, в). Нижележащие горизонты относительно интервала ОГ Кол\_к – ОГ Гипс характеризуются относительно высокими скоростями упругих волн, что свидетельствует о повышенной прочности породного массива и хороших изоляционных свойствах (рис. 3, г).

Согласно картам мощности, в интервале отражающих горизонтов ОГ Кол\_к – ОГ СМТ\_П наблюдается общее увеличение мощности пласта-коллектора в восточном направлении (рис. 3, д). Однако, изменение мощности верхней части интервала, соответствующей ОГ Кол\_к – ОГ Гипс – имеет волнообразный характер в субширотном направлении и более выдержанный в меридиональном (рис. 3, е).

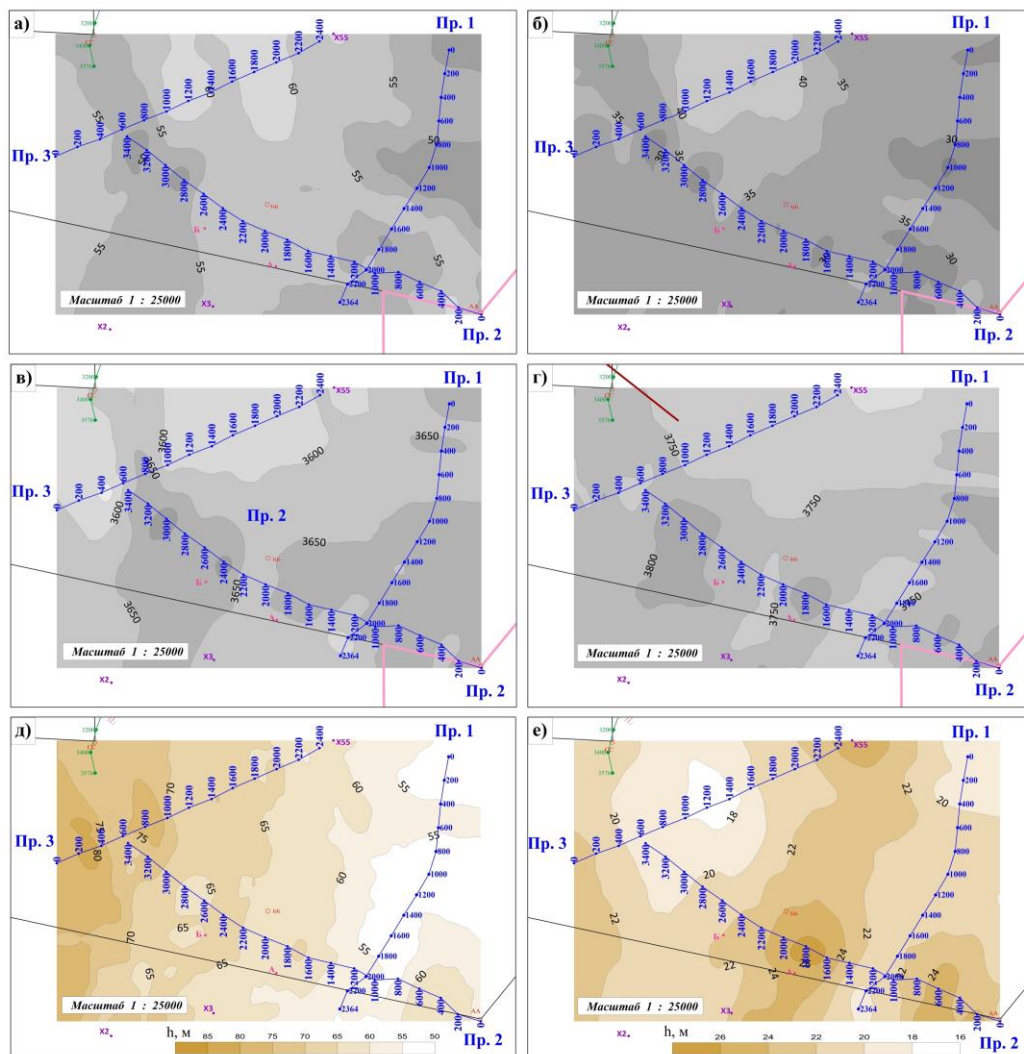


Рис. 3. Структурные схемы отражающих горизонтов: а) - ОГ Кол\_к; б) – ОГ Гипс; Схемы распределения скоростей в интервалах: в) - ОГ Кол\_к – ОГ Гипс; г) – ОГ Гипс – ОГ СМТ\_П; Схемы общей мощности в интервалах коллектора: д) – ОГ Кол\_к – ОГ СМТ\_П; е) – ОГ Кол\_к – ОГ Гипс

По сейсмическим данным в целевом интервале исследований (ОГ СМТ – ОГ СМТ\_П) отмечаются участки потенциально связанные с повышенными коллекторскими свойствами. Они выделяются по ряду осложнений волнового поля, в частности: по нарушению структуры волновой картины, снижению интенсивности колебаний, резким изменениям значений скоростей волн, а также отличаются согласованностью всех негативных изменений анализируемых сейсмических параметров.

Таким образом, по сопоставлению выделенных осложнений в целевом интервале исследований с априорными физико-геологическими моделями, на участке исследования локализованы аномальные зо-

ны двух типов (см. рис. 2), соответствующие областям с повышенными коллекторскими свойствами:

1 тип: структурный – аномалии волнового поля связаны с резкими изменениями гипсометрии отражающих границ вблизи зон разрывных нарушений и сдвиговых дислокаций;

2 тип: литологический – связан с изменчивостью петрофизических свойств исследуемого интервала геологического разреза, выраженной в снижении интенсивности колебаний и значений скоростных параметров.

На основе анализа полученных результатов интерпретации сейсмических данных в пределах профильных линий, наиболее



перспективным для закачки техногенных рассолов выглядит участок к юго-востоку от скважины А. По данным сейсморазведки интервал пласта коллектора (Ог Кол\_к – ОГ Гипс) в пределах данного участка характеризуется наибольшей мощностью и наиболее резким изменением скоростей. Таким образом, по совокупности вышеуказанных параметров, данный участок выступает хорошим резервуаром для закачки техногенных рассолов.

### Электроразведочные работы

Для анализа геоэлектрических особенностей изучаемого разреза, в рамках исследования выполнены электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Сопоставление данных бурения с результатами интерпретации по всем скважинам, расположенным вблизи профилей, позволило провести количественную интерпретацию ВЭЗ и привязать геоэлектрические границы к геологическим поверхностям, соответствующим отражающим горизонтам, выделенным по данным сейсморазведки (рис. 4, а–б).

Согласно результатам количественной интерпретации ВЭЗ интервал соляно-мергельной толщи мозаично осложнен участками аномалий повышенных и пониженных удельных сопротивлений. Так, в интервале, содержащем породы-коллекторы, наблюдаются многочислен-

ные локальные зоны пониженных сопротивлений. Нижележащие отложения характеризуются повышенным удельным сопротивлением, что указывает на их повышенную плотность относительно вышележащих пород-коллекторов.

Зоны повышенных коллекторских свойств, отличаются пониженными значениями удельного электрического сопротивления или же повышенными значениями электропроводности.

С целью локализации участков коллекторов рассчитывались значения суммарной продольной проводимости для исследуемого интервала. Согласно материалам ранее проведенных исследований [10] выполнен расчет продольной проводимости для разуплотненных пород-коллекторов соляно-мергельной толщи, пороговое значение которой составило более 2,3 см/м.

В результате интерпретации данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) установлены аномальные зоны с участками повышенных и пониженных удельных электрических сопротивлений. Зоны низких удельных сопротивлений и высокой электропроводности соответствуют участкам с повышенными коллекторскими свойствами, согласующимися с результатами интерпретации сейсморазведочных данных и ГИС. Наиболее контрастными геоэлектрическими свойствами характеризуется участок к юго-востоку от скважины А.

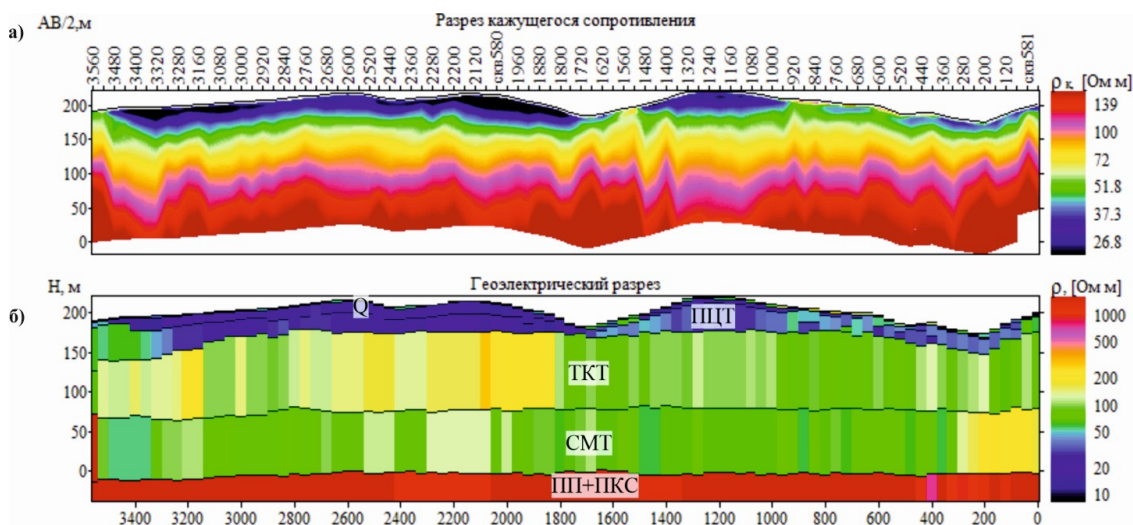


Рис. 4. разрез кажущегося сопротивления – а, геоэлектрические разрезы по профилю 2 – б

**Выводы**

Анализ геолого-геофизической информации прошлых лет и комплексная интерпретация результатов ГИС, сейсмо- и электроразведочных работ позволили выделить наиболее перспективный участок для закачки рассолов к юго-востоку от скважины А (рис. 5).

В качестве критериев потенциального участка выступают:

– совпадение аномальных зон в СМТ, выделяемых по всем геофизическим данным разных лет, и характеризующих повышенные коллекторские свойства разреза;

– повышенная мощность верхней части коллектора (выше реперного пласта гипсов), на основании чего можно предположить и потенциальное увеличение резервуара для закачки;

– повышенная прочность подстилающих коллектор отложений.

Таким образом, предлагаемый подход с использованием комплексных геофизических исследований можно рекомендовать как обязательный при принятии проектных решений по утилизации отработанных рассолов калийного производства в надсоляные отложения в пределах шахтных полей Верхнекамского месторождения солей.

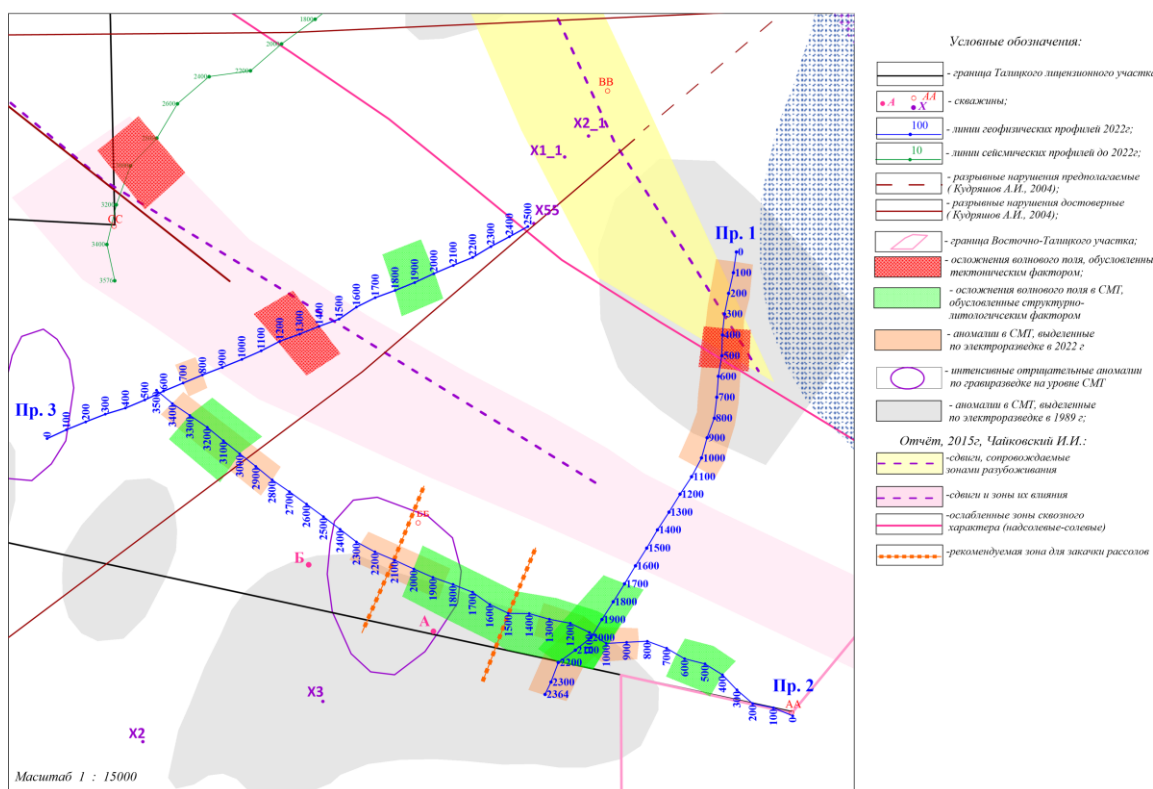


Рис. 5. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных 2022 г

**Библиографический список**

1. Морошкина Ю.Н. [и др.] Технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных разведочных кондиций и подсчетов запасов калийных солей Талицкого участка Верхнекамского месторождения: Отчет по договору № 070В-2011. – Пермь: ОАО «Галургия», 2012.
2. Сапегин Б.И., Белоликов А.И. Отчет о предварительной разведке южной части Верхнекамского месторождения калийных солей. – Чашкино: СГРП, 1965.
3. Сапегин Б.И., Белоликов А.И. Отчет о разведке Верхнекамского месторождения калийных солей, Талицкий участок (подсчет запасов на 01.01.1969 г.). – Чашкино: СГРП, 1969.
4. Кудряшов А.И., Баяндина Э.О., Пушкова О.С. [и др.] Изучение материалов бурения и разработка исходных геологических данных для составления ТЭО постоянных разведочных кондиций Талицкого участка Верхнекамского месторождения. – Пермь: ООО «НПФ «Геопрогноз», 2010.

5. Санфи́ров И.А., Бычков С.Г., Степа́нов Ю.И. [и др.] Комплексные геофизические исследования особенностей геологического строения надсолевого и соляного комплекса пород на территории лицензионного Талицкого участка Верхнекамского месторождения калийных солей. Отчёт по НИР. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2009.
6. Санфи́ров И.А., Степа́нов Ю.И. [и др.] Комплексные геофизические исследования геологического строения особенностей надсолевого и солевого комплекса пород на площади лицензионного Восточно-Талицкого участка Верхнекамского месторождения солей: Отчет по договору №161/2019. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2020.
7. Чайковский И.И., Трапезников Д.Е., Галинова О.И. [и др.] Общий геолого-тектонический анализ состояния водозащитной толщи Талицкого участка ВКМС: Отчет по договору №08/ОГГео/2014 г. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2015.
8. Санфи́ров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
9. Санфи́ров И. А. [и др.] Патент РФ № 2439620 от 15.06.2010 г.
10. Беляев В.П., Орфаницкий В.Л., Петров А.К. Отчет о геофизических работах на Верхнекамской площади за 1987-89 гг. – Пермь: Пермская геологоразведочная экспедиция, 1989.

## GEOPHYSICAL SUBSTANTIATION OF RESERVOIR ROCKS FOR INJECTING EXCESS BRINES FROM POTASH PRODUCTION

Trapeznikova A.B., Yaroslavtsev A.G., Sanfirov I.A.,  
Stepanov Yu.I., Baibakova T.V.

*Mining Institute UB RAS*

### For citation:

Trapeznikova A.B., Yaroslavtsev A.G., Sanfirov I.A., Stepanov Yu.I., Baibakova T.V. Geophysical substantiation of reservoir rocks for injecting excess brines from potash production // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 43–50. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.5>

A range of geophysical research is substantiated in order to identify reservoirs in the interval of the salt and marl formation of the suprasalt complex of the Verkhnekamskoye potash salt deposit for re-injection of waste brines. The choice of injection interval and localization of places for drilling technological wells is justified by comprehensive interpretation of the data of geophysical well surveys, shallow seismic and vertical electrical sounding. Examples of the results of various geophysical methods used to highlight anomalies associated with reservoirs are presented.

*Keywords: reservoirs, shallow seismic exploration, Verkhnekamskoye potash deposit, electrical exploration, well logging.*

### Сведения об авторах

Трапезникова Анна Борисовна, инженер отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614907, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: a.b.trapeznikova@gmail.com

Ярославцев Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, заведующий сектором моделирования сейсмоакустических процессов отдела активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: asa\_gis@mi-perm.ru

Санфи́ров Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, директор, «ГИ УрО РАН»; e-mail: sanf@mi-perm.ru

Степа́нов Ю́рий Ива́нович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией наземной и подземной электрометрии, «ГИ УрО РАН»; e-mail: stepanov@mi-perm.ru

Байбакова Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: baybakova@mi-perm.ru

*Материал поступил в редакцию 06.02.2023 г.*

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕВЗЕИ САФЛОРОВИДНОЙ, ЭСПАРЦЕТА ПЕСЧАНОГО И КЛЕВЕРА ЛУГОВОГО В СОСТАВЕ КОРМОВОЙ СМЕСИ ДЛЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА \*

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

### Для цитирования:

Жданова И.Н., Морозов Н.А. Применение левзеи сафлоровидной, эспарцета песчаного и клевера лугового в составе кормовой смеси для крупного рогатого скота // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 51–57. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.6>

Представлены основные результаты скармливания витаминно-травяной муки из левзеи сафлоровидной, эспарцета песчаного и клевера лугового молодняку и маточному поголовью молочного направления крупного рогатого скота с целью повышения устойчивости к различным заболеваниям. основополагающим направлением в развитии сельского хозяйства Российской Федерации является умножение реализации животноводческой продукции и объемов производства. За последние 5 лет в животноводческих хозяйствах всех категорий у крупного рогатого скота примерно в 45% случаев регистрируются различные болезни неинфекционной природы. Современное скотоводство Пермского края развивается на промышленной основе. Вместе с тем на крупных животноводческих комплексах отмечается перегруженность скота, отсутствие выгула, исключение инсоляции, бесконтрольное и необоснованное скармливание моноорма и др. Нарушения технологического цикла получения и выращивания молодняка, многочисленные стресс-ситуации – всё это сдерживает полноценное создание иммунитета и отрицательно влияет на физиологическое состояние коров. Значительная часть современных лекарств содержит в качестве действующего вещества некоторые антибиотики.

Исходя из вышеперечисленного, в настоящее время в отрасли ведения животноводства Пермского края большое внимание уделяется производству фитокомплексов. Это позволит специалистам зооветеринарной службы агропромышленных комплексов ввести в рационы экологически безопасные добавки для укрепления иммунного статуса и сохранности сельскохозяйственных животных, а также повысить качество получаемой продукции.

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

**Ключевые слова:** лекарственные растения, биологически активные вещества, кормопроизводство, витаминно-травяная мука, крупный рогатый скот, иммуномодуляторы, фитотерапевтика, сельское хозяйство.

### Актуальность

Увеличение каталога кормовых растений на более целебные и высококалорийные будет являться прорывом для улучшения качества и масштабного производства кормов. Научный и практический интерес представляют некоторые местные виды дикорастущих популяций.

Анализ литературных источников за последние годы свидетельствует о том, что у части растений содержатся вещества, способные укрепить иммунный статус человека и животного, повысить возможности организма в борьбе со многими заболеваниями. Безусловно, необходимо обратить внимание на биоактивные вещества растений, имеющих антиоксидантную защиту перед различными болезнями. Направление настоящих исследований относится к экологически чистому безопасному животноводству [2, 4].

В лаборатории биологически активных кормов Пермского НИИСХ с 1969 г. ведутся исследования сортов растений из дикой флоры, обладающих биологически активными веществами для повышения иммунного статуса и увеличения реализации генетически заложенного потенциала у продуктивных животных. Преимуществом выращиваемых нами растений, обладающих адаптогенными свойствами, является возможность их применения без предварительного иммунологического обследования животных. Эти растения способствуют регуляции иммунного статуса.

Левзея (маралий корень) и препараты, изготовленные на его основе, используются в качестве иммуномодуляторов. Рапонтник является кормовым ценным и лекарственным растением. Положительные свойства этого растения-адаптогена заключаются не только в кормовых качествах, но и в эффективности повышения репродуктивных функций человека и животных. Рапонт-

ник – отличный стимулятор природного происхождения, активизирующий на обменные процессы в организме [1].

Эспарцет песчаный обладает высокой урожайностью, а также, что немаловажно для Пермского края, морозо- и холодоустойчивостью. Эспарцет содержит высокое количество сахара, высоко питателен, обеспечивает прекрасную поедаемость продуктивными животными.

В 1 кг сена из эспарцета содержится 11 г кальция, который необходим для построения костной системы молодняку сельскохозяйственных животных, а также 2,5 г фосфора. Преобладание витамина С в листьях эспарцета песчаного способствует укреплению иммунитета, положительно действует на центральную нервную систему и обмен веществ. Аминокислоты, содержащиеся в растении, помогают восстановлению организма после перенесенных заболеваний [3].

Цветки клевера лугового содержат гликозиды триволин и изотрифоллин, эфирное масло, витамины А, С, В, Е, К, флавоноиды, тирозин, ситостерины, кумариновую и салициловую кислоты. Клевер луговой является очень распространенным растением и перспективным лекарственным средством. Растение не токсичное, имеются лишь единичные случаи развития побочных эффектов со стороны желудочно-кишечного тракта [11].

Ранее проведенные исследования показали, что травы левзея сафлоровидная (*R. carthamoides*), эспарцет песчаный (*O. arenari*), клевер луговой (*T. pratense*) содержат в своём составе протеин, сахара, витамины, аминокислоты, дубильные вещества и флавоноиды [8–10]. Анализ биохимического состава и суммы экистероидов и флавоноидов в наземных частях левзеи сафлоровидной и эспарцета песчаного проводили в аналитической лаборатории Пермского НИИСХ и на кафедре физиологии растений ПГНИУ.

**Цель исследований** – определить дозы скармливания витаминно-травяной муки из зелёной массы левзеи сафлоровидной с наибольшим влиянием на динамику роста и биохимический состав крови тёлочек 12-15-месячного возраста.

**Научная новизна исследований** – получены экспериментальные данные о влиянии биологически активных веществ новых для зоны Урала перспективных кормовых культур на динамику роста и биохимический состав крови голштинизированного чёрно-пёстрого скота.

**Методика** – В весенне-летние периоды 2019–2021 гг. нами были проведены научно-производственные опыты по скармливанию витаминно-травяной муки (ВТМ) из зелёной массы клевера лугового, эспарцета песчаного и левзеи сафлоровидной молодняку и коровам в фазах лактации на крупных молочных животноводческих предприятиях Пермского края.

По требованиям ГОСТ Р 56383-2015, корма травяные искусственно высушенные, травяная мука представляет собой белково-витаминный продукт, содержащий витамины и минералы, по питательности не уступающий концентратам.

Научно-производственные исследования были проведены в условиях двух хозяйств Пермского района. Для проведения работ руководствовались методом парных аналогов по методике А.И. Овсянникова [6]. Рационы кормления (ОР) и условия содержания в опытных и контрольных группах были одинаковыми и типичными для предприятий. В рационах животных контрольной группы отсутствовали какие-либо добавки.

Кровь и её сыворотку исследовали в начале и в конце опытов с целью контроля обменных процессов в организме животных под влиянием испытуемых добавок. Для проведения исследований кровь брали утром из ярёмной вены, до кормления у животных из каждой группы.

Морфобиохимические исследования крови проводились в соответствии с об-

щепринятыми методиками на базе аккредитованного ГБУВК «Пермский ВДЦ» [5].

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

**Результаты и их обсуждение.** Для определения оптимальных доз скармливания в состав рациона кормления тёлочек голштинизированной чёрно-пёстрой породы, 30 голов, из которых сформировано 3 группы по 10 голов. Живая масса составляла 241,9–242,5 кг, в возрасте 15 месяцев, животным опытных групп в состав кормов была включена витаминно-травяная мука из *R. Carthamoides*. У тёлочек всех групп базовым являлся 1 кг типового комбикорма. В контрольной группе в дополнение к 1 кг типового комбикорма добавлялся 1 кг экструдата зерна озимой ржи; в I и во II опытной группах – 1 кг экструдата зерна озимой ржи, в состав которого было включено 0,150 кг и 0,300 кг, соответственно, ВТМ из левзеи сафлоровидной

Из анализа биохимического состава витаминно-травяной муки из левзеи сафлоровидной отмечалось, что содержание двадцатого гидроксизидона в первом укусе составляло 0,39% при норме 0,25–0,45% действующих веществ в сухом веществе (СВ) продукта.

В 15-месячном возрасте тёлочки I и II опытных групп по живой массе достоверно превосходили животных контрольной группы I – на 3,6 кг, II – на 11,6 кг (4,84% и 11,68%).

В крови тёлочек всех групп по окончании периода экспериментальных исследований было отмечено увеличение сегментоядерных нейтрофилов на 38,0%, увеличение палочкоядерных – до границы физиологической нормы, увеличение лимфоцитов – на 4,4%, что указывает на повышение неспецифических факторов защиты организма (табл. 1).

Таблица 1

Лейкограмма крови при добавлении в рацион тёлочек ВТМ из *R. Carthamoides*. % ( $M \pm m$ ,  $n=3$ )

Показатель, %	Группы животных		
	Контрольная	I Опытная	II Опытная
В начале опыта			
Базофилы	–	–	–
Эозинофилы	1,7±0,5	1,0±0,8	1,3±0,5
Миелоциты	–	–	–
Юные нейтрофилы	–	–	–
Палочкоядерные нейтрофилы	3,3±0,6	3,0±0,6	1,3±0,7
Сегментоядерные нейтрофилы	25,7±0,5	25,0±0,8	24,7±0,7
Лимфоциты	68,0±0,7	68,3±0,5	59,0±0,6
Моноциты	1,3±0,1	1,7±0,2	1,0±0,1
В конце опыта			
Базофилы	–	–	–
Эозинофилы	3,7±0,4	3,0±0,4	5,7±0,2
Миелоциты	–	–	–
Юные нейтрофилы	–	–	–
Палочкоядерные нейтрофилы	1,7±0,5	1,7±0,2	2,3±1,0
Сегментоядерные нейтрофилы	39,3±0,2	34,3±0,7	40,0±0,1
Лимфоциты	54,7±0,2	61,0±0,5	61,7±0,6
Моноциты	0,3±0,6	2,6±0,5	2,3±0,9

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

Увеличение количества моноцитов наблюдалось также в I и II группах на 34,6 и 54,0% в сравнении с контролем по окончании исследований, что свидетельствует о восстановлении гомеостаза крови.

Получены экспериментальные данные о влиянии скармливания ВТМ из зелёной массы эспарцета песчаного на обменные процессы в организме коров в период после родов.

Исследования проводились на коровах I и II фаз лактации в период с 21 дня до и 50 дней после родов. Отобрано 30 сухостойных коров, из которых сформировали 3 группы по 10 голов в каждой. Все животные получали кормовую смесь, состоящую из соломы овсяной, сенажа клеверного, силоса злаково-бобового и комбикорма с кормовыми добавками. Опытным группам коров была включена ВТМ из эспарцета песчаного: I – 1 кг; II – 2 кг. Период скармливания до и после отёла составил 71 день.

В ВТМ из эспарцета песчаного количество обменной энергии (ОЭ) в СВ составило 8,32 МДж/кг при норме 10,00 МДж/кг. По уровню данных показателей качества

ВТМ по ГОСТ 25513 – 79 класс корма II. Скармливание ВТМ, содержащей флавоноиды и витамины с антиоксидантным эффектом, оказало благоприятный эффект на организм коров, а именно – на картину крови (табл. 2).

После скармливания муки из эспарцета песчаного животным нами была отмечена положительная динамика следующих показателей биохимии крови: содержания альбуминов – на 14,0% и 15,3% и сывороточных белков  $\alpha$ -,  $\beta$ -глобулинов – на 19,5–31,8% в крови опытных групп коров. Уровень мочевины также был выше нормы – на 14,0% в среднем в начале научно-производственного опыта у всех групп животных. К концу опыта этот показатель был в пределах физиологической нормы (5,5–6,4 ммоль/л) в крови опытных групп коров. Уровень глюкозы в крови у коров всех исследуемых групп находился в пределах референсных значений. Уровень витамина Е ( $\alpha$ -токоферол) был в пределах нормативных данных (19,9–23,7 ммоль/л), витамина А – 7,6–8,4 ммоль/л.

Таблица 2

**Биохимические показатели в сыворотке крови коров, % (M±m, n=3)**

Показатель		Группы животных		
		Контрольная	Опытная I	Опытная II
До скармливания				
Общий белок, г/л		71,5±0,1	72,0±0,9	68,9±0,8
Протеино- грамма, %	Альбумины, %	37,5±0,3	38,1±0,2	37,3±0,1
	α-глобулины, %	11,6±0,2*	9,9±0,3*	15,9±0,4
	β-глобулины, %	9,0±0,1	10,8±0,4	12,2±0,3
	γ-глобулины, %	38,9±0,1	35,2±0,6	33,1±0,3
Глюкоза, ммоль/л		3,7±0,5	3,9±1,2	4,6±0,5
Витамин Е, ммоль/л		19,6±0,2	16,8±0,4*	23,7±0,5
Мочевина, ммоль/л		7,2±0,2	7,8±0,6	7,4±0,4
После скармливания				
Общий белок, г/л		72,8±0,2	82,2±0,3	81,2±0,7
Протеино- грамма, %	Альбумины, %	37,8±0,1	44,3±0,3	44,0±0,2
	α-глобулины, %	19,5±0,1	14,5±0,6	11,4±0,1
	β-глобулины, %	15,4±0,2	13,4±0,4	12,6±0,3
	γ-глобулины, %	30,6±0,1	27,8±0,2	32,1±0,1
Глюкоза, ммоль/л		3,0±0,4	1,6±0,7	3,2±0,6
Витамин Е, ммоль/л		24,6±0,9	19,9±0,6	23,7±0,7
Мочевина, ммоль/л		7,7±0,1	5,5±0,3*	6,4±0,2

Примечание: \* - P≥0,95; \*\* - P≥0,99; \*\*\* - P≥0,999 - по сравнению с контрольной группой.

Затем нами проведены исследования по скармливанию клевера лугового на 30 половозрелых коровах крупного рогатого скота в период с 21 дня до отела по 50 день лактации. Животные поделены на 3 группы по 10 голов. ВТМ скармливали в составе концентратной части рациона.

I группа получала по 1,2 кг на голову в сутки; II группа – по 2,4 кг. Длительность скармливания составляла 71 день.

Количество обменной энергии в сухом веществе витаминно-травяной муки составляло в среднем 8,46 МДж/кг при норме 10,00 МДж/кг.

В эксперименте были получены данные: в сравнении с контролем биохимические результаты исследования крови соответствовали физиологическим нормам: после скармливания травяной муки из клевера лугового в конце эксперимента нами было отмечено незначительное увеличение содержания альбуминов – на 14,0% и 15,3% и сывороточных белков α-, β-глобулинов на 19,5–31,8% в крови опытных групп коров (табл. 3).

**Выводы.** Добавление витаминно-травяной муки из левзеи сафлоровидной, эспарцета песчаного и клевера лугового в традиционный рацион животных оказало некоторое стимулирующее влияние на морфологический состав крови по завершению экспериментов. При внесении в основной рацион опытным животным левзеи сафлоровидной величина α-глобулинов у телочек II опытной группы была выше на 21,0%, β-глобулинов у животных I опытной группы – на 29,6%, γ-глобулинов – на 2,3% и 5,1% в обеих опытных группах в конце опыта по сравнению с исходными показателями. После скармливания испытуемой травяной муки из эспарцета песчаного в конце эксперимента нами было отмечено незначительное увеличение содержания альбуминов на 14,0% и 15,3% и сывороточных белков α-, β-глобулинов – на 19,5–31,8% в крови опытных групп коров. Включение в рацион кормления коровам опытных групп витаминно-травяной муки из клевера лугового в дородовой период и в период ранней лактации обеспечивает более бла-



**Показатели обмена белковых соединений  
в сыворотке крови коров, % (M±m, n=3)**

Показатель		Группы животных		
		контрольная	опытная I	опытная II
До скармливания				
Общий белок, г/л		74,7±0,5	72,2±0,6	76,8±0,1
Протеинограмма, %	Альбумины, %	40,1±0,6	39,1±0,5	37,3±0,5
	α-глобулины, %	10,8±0,2*	10,1±0,3*	8,8±0,2
	β-глобулины, %	17,6±0,8	14,1±0,4	14,8±0,3
	γ-глобулины, %	31,5±0,1*	37,0±0,6	39,1±0,9
АЛТ, Е/л		19,7±3,3	30,5±0,9	24,1±0,4
АСТ, Е/л		109,4±2,8	87,9±1,3	90,8±1,1
Мочевина, ммоль/л		-	-	-
Холестерин, ммоль/л		1,7±0,1	2,3±0,1	1,6±0,1
После скармливания				
Общий белок, г/л		68,4±0,5	74,2±0,3	71,9±0,7
Протеинограмма, %	Альбумины, %	38,8±0,7*	39,3±0,3	42,1±0,2
	α-глобулины, %	12,7±0,2	10,0±0,6	9,0±0,1
	β-глобулины, %	19,5±0,5	17,4±0,4	20,0±0,3
	γ-глобулины, %	28,9±0,5	33,0±0,2	28,9±0,1
АЛТ, Е/л		46,7±0,6	26,1±0,5	23,9±0,4
АСТ, Е/л		111,1±0,4*	102,3±0,3	92,5±0,2
Мочевина, ммоль/л		5,4±0,1	6,2±0,3*	5,9±0,2
Холестерин, ммоль/л		3,4±0,6	3,0±0,9	2,9±0,5

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

гоприятные условия для успешного оплодотворения животных. Оплодотворяемость коров от первого осеменения составила в контрольной группе 10%, в I опытной – 20%, во II опытной – 40%. Всё это

свидетельствует о стимуляции защитно-приспособительных реакций организма в ответ на скармливание витаминно-травяной муки, содержащей флавоноиды и витамины с антиоксидантным эффектом.

**Библиографический список**

1. Авдеев Н.В. Привлекательность левзеи для медоносной пчелы // Кормопроизводство. – 2019. – № – 11. – С. 22–26.
2. Арушанян Э.Б. Адаптогены растительного происхождения: учеб. пособие для студентов. – Ставрополь: Изд-во СГМУ. – 2017. – 149 с.
3. Волошин В.А. Предварительные итоги изучения эспарцета песчаного в Пермском крае // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2015. – № 1. – С. 49–55.
4. Жданова И.Н. Влияние витаминно-травяной муки из г. carthamoides на показатели крови молодняка крупного рогатого скота // Аграрная наука – 2022. – № 2. – С. 28–31.
5. Кондрахин И.П. Клиническая лабораторная диагностика в ветеринарии. – М., – 1983. – 63 с.
6. Овсянников А.И. Основы опытного дела. – М.: Колос. – 1976. – 304 с.
7. Плохинский Н.А. Биометрия. – М.: Изд-во МГУ. – 1970. – 367 с.
8. Todorova V., Ivanov K., Ivanova S. Comparison between the Biological Active Compounds in Plants with Adaptogenic Properties (Rhaponticum carthamoides, Lepidium meyenii, Eleutherococcus senticosus and Panax ginseng // Plants. – 2022. – Vol.11. – № 1. – P. 64.

9. *Samoilova Z., Smirnova G., Bezmaternykh K., Tyulenev A., Muzyka N., Voloshin V., Maysak G., Oktyabrsky O.* Study of antioxidant activity of fodder grasses using microbial test systems // *J. Appl. Microbiol.* – 2022. – Vol. 132. – № 4. – P. 3017–3027.
10. *Mohsen A., Fatemeh K., Leila N., Mona P., Mohammad Z., Mozafar K.* Pharmacological and therapeutic properties of the Red Clover (*Trifolium pratense* L.): an overview of the new finding // *J. Tradit. Chin. Med.* – 2021. – Vol. 41. – № 4. – P. 642–649.
11. *Kolodziejczyk-Czepas J.* Trifolium species-derived substances and extracts--biological activity and prospects for medicinal applications // *J. Ethnopharmacol.* – 2012. – Vol. 143. № 1. – P. 14–23.

**APPLICATION OF SAFFLOWER, SAINFOIN AND MEADOW CLOVER IN THE FEED MIXTURE FOR CATTLE**

Zhdanova I.N., Morozov N.A.

*Perm Scientific Research Institute of Agriculture*

**For citation:**

*Zhdanova I.N., Morozov N.A.* Application of safflower, sainfoin and meadow clover in the feed mixture for cattle // *Perm Federal Research Center Journal.* – 2023. – № 1. – P. 51–57. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.6>

The article presents the main results of vitamin-grass meal feeding of safflower, sainfoin and meadow clover to young and dairy cattle in order to increase their resistance to various diseases. The fundamental direction in the development of agriculture in Russia is to multiply the realization of livestock products and production volumes.

Over the past 5 years in cattle farms of all categories various diseases of non-infectious nature have been registered in cattle in about 45% of cases. Modern cattle breeding in Perm Region is developing on an industrial basis. At the same time, large livestock complexes are overloaded with cattle, and there is a lack of walking, exclusion of insolation, uncontrolled and unreasonable feeding of monofeed, etc. Violations of the technological cycle of receiving and growing young cattle, numerous stress situations – all this inhibits the full creation of immunity and negatively affects the physiological condition of cows. A significant part of modern drugs contains some antibiotics as an active ingredient. Based on the above, currently in the livestock industry of Perm Region much attention is paid to the production of phytocomplexes. This will allow specialists of the zooveterinary service of agroindustrial complexes to introduce environmentally safe additives into rations to strengthen the immune status and safety of farm animals, as well as to improve the quality of the resulting products.

*Keywords: medicinal plants, biologically active substances, fodder production, vitamin-grass meal, cattle, immunomodulators, phytopharmacology, agriculture.*

**Сведения об авторах**

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

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

*Материал поступил в редакцию 19.01.2023 г.*

# ЭТЮДЫ О НАУКЕ



## ОТКРЫТИЕ, КОТОРОЕ ИЗМЕНИЛО МИР (о роли Пермской науки в рождении и применении сильвинитовой спелеоклиматотерапии)

Г.З. Файнбург, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет;  
Горный институт УрО РАН*

А.Г. Исаевич, *Горный институт УрО РАН*

### Для цитирования:

Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Открытие, которое изменило мир (о роли Пермской науки в рождении и применении сильвинитовой спелеоклиматотерапии) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 64–71. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.7>

Рассматривается роль Пермских ученых в возникновении и развитии сильвинитовых спелеоклиматических камер, ныне успешно используемых для лечения хронических вялотекущих ХОБЛ различной этиологии; различных аллергопатий типа бронхиальной астмы, поллинозов, аллергических дерматитов, а также для купирования различных проявлений стрессорного и постстрессорного состояния. Успех лечения и/или оздоровления при спелеоклиматотерапии связан с комплексным интегральным неспецифическим воздействием особой лечебной окружающей пациента соляной воздушной аэродисперсной среды спелеокамер на весь человеческий организм в целом, позволяющим «включить» все внутренние репаративные и саногенетические механизмы нормализации его физиологического функционирования. Предлагается использовать особенности метода для борьбы с последствиями острых респираторных заболеваний, включая грипп и ковид.

Описаны результаты успешной практики лечения в сильвинитовых спелеоклиматических камерах по восстановлению нормальных физиологических процессов адаптации организма к неблагоприятным изменениям окружающей среды и тем самым достижения его полного излечения или стойкой ремиссии (до нескольких лет).

**Ключевые слова:** *сильвинит, спелеокамера, спелеотерапия, спелеоклиматотерапия, калийные рудники, соляные пещеры, антиаллергия, антистресс.*

### Введение

Осенью 1982 года в рабочем порядке коллективом авторов Пермских политехнического и медицинского институтов была подана заявка на авторское свидетельство [1], в которой впервые в мире было предложено использовать для лечения заболеваний органов дыхания «климатическую камеру», содержащую:

– лечебную палату – помещение, стены которой выполнены из блоков соляных горных пород,

– фильтр-насытитель из дробленой мелкокусковой руды соляных горных пород, насыщающий подаваемый в камеру воздух наноразмерными соляными аэрозолями и легкими отрицательными аэроионами и делающий его лечебным,

– другие технические системы вентиляции, используемые для проветривания лечебной палаты.

Прошло полтора года, и в начале 1984 г. это авторское свидетельство было признано оригинальным с приоритетом от 22.10.1982 г., зарегистрировано и опубликовано. За прошедшие 40 лет это свидетельство породило огромное количество самых разнообразных последующих конструкций (и их авторских свидетельств и патентов) соляных помещений для лечения, которые, получая все новые и новые названия, тем не менее, сохраняют вышеописанную принципиальную компоновку [2].

Сегодня эти конструкции известны всему миру как сальвинитовые спелеоклиматические камеры, спелеокамеры, галокамеры, галоклиматические камеры, микроклиматические камеры, соляные камеры и даже соляные пещеры. Последнее название стало торговым брендом и под англоязычным именем «salt cave» распространилось по всем континентам, исключая Антарктиду, и породило примерно 65 млн ссылок в сети Интернет.

А недавно самая современная сальвинитовая спелеоклиматическая камера была построена в Горном институте УрО РАН – она станет экспериментальной платформой новых исследований влияния ее внутренней воздушной среды на организм человека (рис. 1).

Сегодня во всем мире десятки миллионов людей успешно занимаются соляной терапией, спелеотерапией, спелеоклиматотерапией, галотерапией – т.е. оздоровлением и лечением своего организма в борьбе с аллергиями, ослаблением иммунитета, постстрессорными состояниями в помещениях из соляных горных пород, впервые предложенных и затем развитых Пермскими учеными.

Так незаметная тогда деятельность Пермских ученых привела к явлению всемирно-исторического значения – появлению новых технологий немедикаментозного лечения больных и оздоровления здоровых, защищающих от аллергии, стресса,



Рис. 1. Сальвинитовая спелеоклиматическая камера в ГИ УрО РАН

гипертонии, последствий гриппа или ковида в аэродисперсных соляных средах сальвинитовых спелеоклиматических камер.

Но откуда у пермяков возникла такая идея? Как она родилась? Почему оказалась востребованной?

### **Живой воздух природы как средство благоприятного воздействия на организм**

Человечество давно уже поняло целебную силу воздуха моря, гор и лесов, аргументируя это «чистотой» свежего природного воздуха, привычного нашему организму за миллионы лет эволюции. Сегодня мы можем объяснить это тем, что морской воздух содержит большое количество соляных аэрозолей и аэроионов, горный воздух – много кластерных легких аэроионов, образованных УФ-излучением Солнца и водопадами, лесной воздух – аэрозоли фитонцидов и аэроионы. Все эти электростатически заряженные аэрозольные и кластерные образования способствуют «нейтрализации» аллергенов, вирусов и бактерий, «привязывая» их к себе и тем самым не давая им воздействовать на организм человека, ибо такое взаимодей-

ствии идет биохимическим путем по принципу «ключ-замок» и нуждается в «чистоте» молекул «ключа».

Идея лечить заболевания легких «чистым» воздухом была разумной, а главное, успешной на практике. Вот почему богатые больные стали ездить на морские и горные курорты, а более бедный люд довольствовался лесом, если он был. Люди давно обратили внимание на чистоту воздуха в пещерах, и хотя именно в них и сохранилась в эпоху обледенения человеческая популяция, такое экзотическое место пребывания не могло стать курортом.

Когда в 1944–1945 гг. англо-американская авиация массово бомбила Германию, то население вынуждено было прятаться в бомбоубежища, воздушная среда которых была ужасной и с трудом переносимой. Но в небольшом городе Эннепегаль в качестве бомбоубежища использовали гроты пещеры Клутерт, расположенной в горе того же названия прямо в центре города, и воздух там был чистым и неожиданно для многих – «лечебным». Проводившие там время бомбардировок больные астмой обратили внимание на то, что пребывание в ней приводило к улучшению их состояния, например, к снижению частоты астматических приступов. Это стало известно А. Бартцу, историку, общественному деятелю и куратору исторической пещеры, и он уговорил доктора общей практики К. Спаннагеля заняться этой проблемой. Так к концу 40-х годов XX века родилась «спелеотерапия» (лечение в пещерах) [2].

В середине 50-х годов XX века доктор М. Скулимовский, работавший врачом на соляных коях Велички (Польша) и любивший рыться в старинных документах, вычитал в рукописных дневниках главного врача соляных копей Велички Ф. Бочковского (от 1843 г.) о том, что шахтеры соляных копей Велички, как обычно, болели разнообразными болезнями, связанными с тяжелым ручным трудом в соляных коях, но, и это было удивительно, практически не болели заболеваниями легких.

Опираясь на эти наблюдения вековой давности, М. Скулимовский организовал лечение больных астмой и бронхитами в горных выработках соляных копей Велички, получившее название «подземная терапия», поскольку она не была связана с пещерами.

В середине 60-х годов XX века по опыту Велички такое лечение было организовано в соляных коях Солотвино (Закарпатская Украина). Именно там закарпатские медики начали научное обоснование спелеотерапии в каменно-соляных шахтах. Об этом стало известно в Перми. По инициативе А.Е. Красноштейна и В.А. Старцева, поддержанной Л.М. Папуловым, было решено построить подземную лечебницу на 1-м Березниковском калийном руднике.

В мае 1977 г. была открыта подземная лечебница, впервые в мире размещенная не в пещерах и не в каменно-соляных рудниках, а в специально пройденных горных выработках калийного рудника (рис. 2).



Рис. 2. Первая в мире спелеолечебница в калийном руднике (Пермский край, г. Березники)

Начавшиеся сразу же исследования Пермских ученых – медиков и горняков носили клинико-медицинский, санитарно-гигиенический и аэрологический характер. Они показали высокую эффективность лечения и отличное качество «лечебного» воздуха. Было ясно, что уникальные свойства такого воздуха формируются из-за взаимодействия воздуха с соляной поверхностью (включая поверхность соляных аэрозолей). Сегодня известно, что каменно-соляная аэрозоль лучше воздействует на бронхиты и аналогичные заболевания бронхолегочной системы, а аэрозоль калийных пластов и природное излучение от калийных солей – на аллергические заболевания.

Успешность лечения была высокая, желающих лечиться стало много, образовалась огромная очередь [3], и оказалось, что спустить всех желающих лечиться под землей в рудник не получается. Тогда у В.А. Старцева, горного инженера, доцента Пермского политеха и энтузиаста спелеолечения, возникла идея «создать» подземный лечебный воздух на поверхности Земли в специальных помещениях – климатических камерах.

Первая в мире сильвинитовая спелеоклиматическая камера была построена в 1989 г. работниками ПО «Сильвинит» в г. Соликамске Пермской области в медсанчасти «Калиец». Сегодня таких сильвинитовых спелеоклиматических камер построено только в России более полутора тысяч, и все они успешно работают. При этом многие санатории имеют в своем распоряжении и успешно эксплуатируют несколько спелеокамер. Сотни тысяч пациентов прошли в них оздоровление и лечение.

Успехи Пермских ученых породили «конкурентов» – галокамеры из природного галита (минерал и горная порода из натрия хлорида, известного всем как поваренная соль) с галотерапией, характерной особенностью которой стал специальный галогенератор сухой дробленой соли. Сегодня ясно, что это иной метод лечения с иной технологией, назначением и результатами. Несмотря на различия, эти два способа оп-

ределили все конструкции и технологии лечения в «соляных пещерах», конкурируя между собой и одновременно предоставляя науке материал для сравнения.

### **Соленый воздух – лечебная аэродисперсная среда сильвинитовых спелеокамер**

Сегодня мы знаем [3, 4], что в сильвинитовой спелеоклиматической камере поддерживаются определенные лечебные параметры внутренней среды:

- повышенное (по сравнению с обычными условиями) содержание легких аэроионов и специфическое распределение их по подвижности и заряду, выражающееся в превалировании отрицательно заряженных аэроионов кластерной природы;

- многоэлементный химический состав (близкий к составу морского аэрозоля) субмикронного респирабельного соляного аэрозоля, включающий хлориды натрия, калия, магния и кальция, а также все другие жизненно необходимые микроэлементы в следовых количествах;

- повышенное (по сравнению с обычными условиями) содержание соляного респирабельного аэрозоля конденсации наноразмеров и специфическое спектральное распределение его по размерам (массе), характеризующееся превалированием нано- и субмикронных частиц;

- незначительно повышенное и не выходящее за пределы естественного радиационного фона мягкое бета- и гамма-излучение повсеместно распространенного природного изотопа калия-40, вызывающее постоянное генерирование легких отрицательных аэроионов, а также (у живых организмов) эффект радиационного гормезиса (нормализации систем гомеостаза) [3, 4] из-за его привычного для нас фона.

Параметры окружающей пациента среды в лечебном пространстве сильвинитовой спелеоклиматической камеры близки к условиям подземных спелеолечебниц калийных рудников, в первую очередь Березниковской спелеолечебницы в калийном руднике Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей.

Напомним, что воздушная среда традиционно характеризуется химическим составом и микроклиматическими параметрами – температурой, влажностью, барометрическим давлением, подвижностью. Помимо этого качество воздушной среды определяется аэрозольными и электрическими характеристиками: содержанием и спектральным составом аэроионов – заряженных кластеров, а также химическим составом и спектром (по размерам) соляных частиц аэрозоля. В целом воздух представляет собой сложнейшую пространственно-неоднородную физико-химическую систему, непрерывно находящуюся в динамике преобразований. Конденсация, испарение, сублимация, агрегирование, зарядка/разрядка аэрозоля и рекомбинация аэроионов, радиоактивный распад и химические превращения, движение воздуха и изменение температуры и влажности – все это определяет итоговое состояние воздушной среды, благоприятность или неблагоприятность ее воздействия на организм человека. Кроме того, воздух служит средой обитания разнообразной микроскопической биоты, несет в себе биоаэрозоли, включая пыльцу, бактерии, вирусы и коронавирусы.

Все это учтено в сальвинитовой спелеоклиматической камере (рис. 3), в которой благодаря процессам взаимодействия воздуха с соляной полиминеральной (минералы: галит (натрий хлорид), сальвин (калий хлорид), карналлит (магний и калий хлорид) поверхностью поддерживается лечебная воздушная среда, имеющая

иммуномодулирующее, противовоспалительное, бактерицидное, противовирусное, фунгицидное, цитостатическое, антистрессовое и анальгезирующее воздействие на организм человека, особенно детей.

### Некоторые особенности интервального воздействия лечебной среды

Опыт космонавтики показал, что наш организм настолько приспособлен к непрерывным изменениям внешней среды, что в стабильной благоприятной среде гермообъектов (космических кораблей) нормально существовать не может, начинает почти мгновенно (за несколько дней) «разрушаться», заболевает. Оптимальной для здорового человеческого организма оказалась не строго постоянная среда с оптимальными параметрами, как думали раньше все медики, гигиенисты и инженеры, а непрерывно изменяющаяся среда с периодически отклоняющимися от оптимальных (но не чрезмерно далеко) параметрами. Входя на время в сальвинитовую спелеоклиматическую камеру, а затем, возвращаясь в привычную среду, организм ощущает изменения и подстраивается к ним. Чтобы лечение стало особенно эффективным, его следует соотносить с ритмами физиологических процессов. Днем в спелеокамере для качественного лечения нужно проводить 2–4 часа, а еще лучше спать в ней ночью 8 часов (что и делают все пациенты подземных спелеолечебниц). Это вытекает из циркадных ритмов. Учет лунного цикла говорит о том (и эксперимент это подтверждает),



Рис. 3. Сальвинитовая спелеоклиматическая камера (один из вариантов)



что оптимальное лечение в сильвинитовой спелеоклиматической камере должно состоять из 20 процедур, а минимально возможное – 10 сеансов.

Лечение методами спелеоклиматотерапии может успешно применяться в виде монотерапии и быть связанным только с воздействием лечебной среды сильвинитовой спелеокамеры, а может безболезненно сочетаться с другими видами лечебно-профилактического воздействия.

Все заболевания должны иметь умеренную или среднюю тяжесть, находиться в стадии полной или неполной ремиссии, без явных органических изменений (например, легочной эмфиземы или пневмосклероза). В этих условиях эффективность лечения достигает более 80% случаев, а для пылевых бронхитов даже более 96%.

#### **Основной механизм воздействия спелеоклиматотерапии - гормезис**

Основной механизм реабилитации организма больного человека при прохождении курса спелеоклиматотерапии связан с эффектом гормезиса при «слабом» (приблизительно естественного уровня) переменном (интервальном) внешнем воздействии, вызывающем неспецифическую реакцию адаптации и через нее – благоприятно воздействуя на иммунную защиту организма, укрепляя иммунитет.

Одним из механизмов этого воздействия является включение под воздействием низкоэнергетического излучения изотопа калий-40 репаративных механизмов восстановления поврежденной ДНК, которые заодно с основным повреждением исправляют ранее привнесенные повреждения другой природы, связанные с иммунитетом и аллергизацией организма. В результате происходит «ревитализация» (возрождение, оживление, омоложение) организма.

Наряду с этим неспецифическим эффектом соленый воздух оказывает и специфическое действие на организм пациентов благодаря соляным аэрозолям нано- и субмикронных размеров, а также отрицательно заряженным лигандам ки-

слорода (легкие аэроионы). Например, соленый воздух улучшает мукоцилиарный клиренс, разжижает мокроту и значительно улучшает бронхиальную проводимость, благоприятно влияя на реактивность бронхов и на слизистые поверхности дыхательных путей, а отрицательно заряженные лиганды кислорода производят антиоксидантные действия.

#### **Успехи и перспективы**

Успехи в лечении астмы и поллинозов позволили распространить методы сильвинитовой спелеоклиматотерапии для лечения аллергодерматозов. Выяснилось, что в условиях специфической лечебной среды сильвинитовой спелеоклиматической камеры происходит не только местное специфическое влияние лечебных факторов на организм человека, но и общее, неспецифическое, комплексное, адаптогенное воздействие.

Исследования показали, что нахождение в условиях сильвинитовой спелеоклиматической камеры приводит к повышению эластичности кожи, выравниванию цвета лица, связанному как с местным специфическим действием, так и с общим опосредованным воздействием за счёт улучшения состояния системы органов дыхания и кровообращения, а также нормализующего действия лечебной соляной среды на вазомоторный компонент.

В основе иммунокорректирующего воздействия в этих случаях лежит снижение аллергенной нагрузки за счет особой чистоты (включая отсутствие аллергенов) воздуха сильвинитовой спелеоклиматической камеры, противовоспалительных и антисептических свойств соляного (особенно калийного) аэрозоля в отношении патогенных бактерий, населяющих слизистые оболочки.

Обнаружение комплексного неспецифического общего воздействия лечебной среды сильвинитовой спелеокамеры на организм человека позволило не только сформулировать концепцию особого – гормезисного – характера такого воздействия, приводящего к уменьшению кли-

нических проявлений различных патологий и к нормализации функционального состояния организма, но и приступить к исследованию возможности применения сильвинитовой спелеоклиматотерапии в качестве мягкого природного компонента комплексной коррекции (адаптотерапии, ревитатерапии) донозологического и предморбидного состояния организма, а также лечения других нозологий.

Среди этих болезней интерес вызывают заболевания сердечно-сосудистой системы, тесно связанные с состоянием дыхательной системы. Поэтому даже из чисто теоретических соображений можно было бы предположить, что сильвинитовая спелеоклиматотерапия окажет положительное воздействие на заболевания сердечно-сосудистой системы, что и было подтверждено на практике.

В ряде работ также успешно апробировано применение сильвинитовой спелеоклиматотерапии в качестве метода коррекции пограничных функциональных состояний и профилактики утомления. Положительный эффект проявлялся снижением уровня невротизации, значительным расширением физиологических резервов кардиореспираторной системы, повышением физической работоспособности человека.

Эти достижения позволили перейти к еще более актуальным заболеваниям.

В современных, быстро меняющихся условиях социальной среды с ее социальной напряженностью и межличностными конфликтами, все большее значение имеет психоэмоциональный стресс. В свою очередь, психоэмоциональный стресс неблагоприятно воздействует на регуляторные системы организма человека: нервную, эндокринную и иммунную, объединенные, благодаря многочисленным взаимосвязям между ними, в единую «сверхсистему» жизнеобеспече-

ния. В результате происходит нарушение функционирования этой сверхсистемы, что в конечном итоге приводит к формированию вторичного иммунодефицита, который открывает дорогу различным дезадаптациям, т.е. болезням. При этом общепринятые методы профилактики и коррекции стресс-индуцированных расстройств иммунной системы с помощью медикаментозных средств зачастую не дают желаемого эффекта.

В связи с этим использование адаптивного немедикаментозного метода воздействия на иммунную систему, т.е. сильвинитовой спелеоклиматотерапии, как адаптотерапии и ревитатерапии, оказалось весьма интересным и плодотворным.

Было установлено, что сильвинитовая спелеоклиматотерапия обладает возможностями коррекции стресс-индуцированных изменений иммунодефицита у лиц, деятельность которых связана с хроническим психоэмоциональным стрессом.

### Вместо заключения

Положительные результаты воздействия лечебной среды сильвинитовых спелеоклиматических камер на иммунную систему человека показали, что такое лечение можно использовать в качестве метода немедикаментозной иммуностимуляции, снижения интенсивности аллергических заболеваний.

Кроме того, в условиях роста антибиотикорезистентной микрофлоры, тотальности психоэмоционального стресса, пандемических опасностей новых вирусных инфекций открытые Пермскими учеными возможности укрепления иммунитета, активизации нормального (здорового) функционирования всех систем человеческого организма открывают особые перспективы для длительного сохранения здоровья, и возможно, даже замедления старения организма.

### Библиографический список

1. Климатическая камера: а.с. SU 1068126 А. / В.Г. Баранников, А.В. Туев, Н.Л. Чекина, А.Е. Красноштейн, В.А. Старцев, В.Я. опубл. 23.01.1984 г., бюл. № 3.

2. Файнбург Г.З. «Соляная пещера» – артефакт всемирно-исторического значения, рожденный в Перми // Пещеры: сб. науч. тр. / Естественнонаучн. ин-т Перм. гос. нац. иссл. ун-та. – Пермь, 2016. – Вып. 39. – С. 83–100.
3. Верихова Л.А. Спелеотерапия в России. Теория и практика лечения хронических заболеваний респираторного тракта в подземной сильвинитовой спелеолечебнице и наземных сильвинитовых спелеоклиматических камерах. – Пермь, 2000. – 231 с.
4. Спелеотерапия в калийных рудниках и спелеоклиматотерапия в сильвинитовых спелеокамерах: теоретические основы и практические достижения. К 40-летию начала применения калийных солей для спелеолечения / Под ред. д-ра мед. наук, проф. И.П. Корюкиной и д-ра тех. наук, проф. Г.З. Файнбурга. – Изд. 2-е, доп. и испр. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2017. – 303 с.

**THE DISCOVERY THAT CHANGED THE WORLD  
(ABOUT THE ROLE OF PERM SCIENCE IN THE ORIGIN AND APPLICATION  
OF SYLVINITE SPELEOCLIMATOTHERAPY)**

Faynburg G.Z.<sup>1,2</sup>, Isaevich A.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Mining Institute UB RAS*

<sup>2</sup> *Perm National Research Polytechnic University*

---

**For citation:**

*Faynburg G.Z., Isaevich A.G. The discovery that changed the world (about the role of Permian science in the birth and application of silvinit speleoclimatotherapy) // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 59–66. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.7>*

---

The role of Perm scientists in the origin and development of sylvinit speleoclimatic chambers, now successfully used for the treatment of chronic sluggish COPD of various etiologies is considered: various allergopathies such as bronchial asthma, pollinosis, allergic dermatitis, as well as for the relief of various manifestations of stress and post-stress conditions. The success of treatment and/or rehabilitation of a patient with speleoclimatotherapy is associated with a complex integral nonspecific effect of special therapeutic aerodisperse salt environment of speleocamers on the entire human body, which makes it possible to «turn on» all internal reparative and sanogenetic mechanisms for normalizing its physiological functioning. It is proposed to use the features of the method to combat the consequences of acute respiratory diseases, including influenza and covid.

The results of successful practice of treatment in sylvinit speleoclimatic chambers to restore normal physiological processes of adaptation of the body to adverse environmental changes and thereby achieve its complete cure or stable remission (up to several years) are described.

*Keywords: sylvinit, speleocamera, speleotherapy, speleoclimatotherapy, potash mines, salt caves, anti-allergy, anti-stress.*

**Сведения об авторах**

*Файнбург Григорий Захарович*, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, директор Института безопасности труда, производства и человека, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29; главный научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614907, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: faynburg@mail.ru

*Исаевич Алексей Геннадьевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела аэрологии и теплофизики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: aero\_alex@mail.ru

*Материал поступил в редакцию 08.02.2023 г.*

## К 75-ЛЕТИЮ КУНГУРСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ-СТАЦИОНАРА ГОРНОГО ИНСТИТУТА ПФИЦ УРО РАН

Д.В. Наумкин, Горный институт УрО РАН  
О.И. Кадебская, Горный институт УрО РАН

### Для цитирования:

Наумкин Д.В., Кадебская О.И. К 75-летию Кунгурской лаборатории-стационара Горного института ПФИЦ УрО РАН // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 67–83. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.8>

### Научный стационар в «городе на решетке»

В 1734 г. назначенный начальником уральских горных заводов Вильгельм де Геннин, который в целом не находил «особливых куриозностей в г. Перми», проезжая кунгурскими землями, обратил внимание на характерную особенность местного пейзажа: *«В оном же Кунгурском уезде имеются великие и малые чистые ямы или провалыны, подобием обращенного конуса, вверху широки, а внизу узки, под которыми слышно шум, якобы течение рек под землею». Еще ранее В.Н. Татищев, объясняя природу образования подземных гротов и пещер, писал, что они формируются выносом «лехких частиц» поверхностными и подземными водами из «известкового или гипсового камня». Сегодня это природное явление известно под названием «карст».*

Геологический термин «карст» (употребляется исключительно в единственном числе!) происходит от германизированного варианта географического названия возвышенного известнякового плато Крас, по которому сегодня проходят границы Италии и Словении. Великолепная природа, мягкий климат, а главное – множество знаменитых и очень крупных известняковых пещер уже давно

привлекают сюда огромное количество туристов со всей Европы. Карст широко распространен по земному шару. Он встречается на всех континентах, во всех климатических поясах Земли, там, где залегают осадочные породы, способные растворяться в воде. В зависимости от литологического типа пород различают известняковый, доломитовый, меловой, мраморов, гипсово-ангидритовый и соляной карст; их можно сгруппировать в три категории – карбонатный, сульфатный и соляной карст.

Основными условиями возникновения карста, помимо наличия карстующихся (способных к растворению) пород, являются их трещиноватость (способствующая проникновению движущейся воды вглубь массива породы) и способность воды к растворению (т.е. ее ненасыщенность растворенными минералами). Когда все условия выполняются, начинает развиваться карст, проявления которого бывают поверхностными и подземными.

Поверхностные формы карста очень разнообразны. Они различаются в первую очередь масштабами проявлений – от карстовых депрессий и котловин площадью в десятки км<sup>2</sup> до карстовых воронок в десятки метров диаметром и блюдцеобразных впадин, иногда совсем небольших размеров. В тропиках часто встречаются

поверхностные каровые поля – пространства обнаженного (без почвенного покрова) карста, имеющие сильно корродированную поверхность.

Главная форма подземного карста – это пещеры. Карстоведы выделяют множество их морфологических типов. Здесь же мы лишь подчеркнем, что самые длинные и объемные пещеры нашей планеты образуются в известняках, гипсовые пещеры сильно уступают им по числу, протяженности и особенно по объему, а соляных пещер совсем мало, и они редко достигают больших размеров и протяженности. Образование и развитие карстовых пещер неразрывно связано с водой. Вода – хозяйка пещеры, растворяя карстующиеся породы, она создает в них пустоты. Она же, отлагая известь, приносит гальку и песок, заполняет их. Без воды невозможна активная жизнь пещер.

В юго-восточной части Пермского края расположен один из крупнейших в стране районов классического сульфатного карста, на проявления которого (воронки, провалы, пещеры) обращали свое внимание и В.Н. Татищев, и В. де Геннин. Гипс широко распространен здесь и как основной слагающий элемент земной коры, и как минеральное сырье. В Кунгурском и прилегающих к нему соседних административных округах Пермского края насчитывается более сотни гипсовых пещер, многочислен-

ные береговые гипсовые обнажения, здесь сосредоточены и крупные действующие карьеры по добыче как строительного, так и высокодекоративного гипса поделочных сортов. При этом нужно подчеркнуть, что карст, особенно на промышленных и урбанизированных территориях, представляет собой существенный геоэкологический фактор, ограничивающий и усложняющий строительство зданий и сооружений, а также линейных объектов.

Все это и привело к тому, что еще в 1948 г. в Кунгуре – «городе на решетке» (где до 1970-х гг. возведение массовой многоэтажной застройки стояло под вопросом), возле знаменитой Кунгурской пещеры появилось специализированное научное учреждение – Уральский филиал комплексной карстово-спелеологической станции МГУ. Ректор МГУ академик А.Н. Несмеянов определил задачи станции [2] как комплексное изучение карста и пещер Пермской области и Урала в целом; проведение систематических стационарных наблюдений в пещерах (в первую очередь в «Кунгурской ледяной, которая по грандиозности и разнообразию не имеет равных в нашей стране»); сбор и обработку литературных данных по вопросам комплексного изучения карстового процесса и пещер Урала; массовую научно-просветительскую работу (последнее – по представлению Кунгурского горисполкома) (рис. 1). Научным руково-



Рис. 1. Здание Дома туриста, где и появился Кунгурский стационар в 1948 г.

директором станции была назначена известная исследовательница Урала доктор геолого-минералогических наук В.А. Варсанофьева, а заведующим – В.С. Лукин. Их связывали многолетнее творческое сотрудничество и дружба, оставившая после себя обширную переписку [7]. В 1952 г. станция МГУ была передана в состав вновь организованного Уральского филиала АН СССР и реорганизована в научно-исследовательский стационар, который включили в состав Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого (г. Свердловск). В 1988 г. в г. Перми был организован Горный институт УрО РАН, в состав которого и передали стационар в качестве лаборатории [5].

С первых лет существования стационара сложился творческий работоспособный коллектив (рис. 2), который отличался стабильностью и просуществовал вплоть до 1990-х гг. [5]. С 1948 г. на должностях директора (заведующего стационаром) сменились 10 человек: В.С. Лукин (1949–1951); Я.П. Щур (1951–1952); Д.В. Рыжиков (1952–1955); А.В. Турышев (1955–1967); В.С. Лукин (1967–1986); С.А. Фаяршин (1986–1987); В.Н. Андрейчук (1987–1994); И.И. Яцына (1994–1997); И.А. Лавров (1997–2001); О.И. Кадебская (2001–2009); Н.П. Панчуков (2009–2015); О.И. Кадебская (с 2015). В.С. Лукин и О.И. Кадебская, проявившие себя наиболее талантливыми администраторами, возглав-

ляли стационар повторно, в наиболее напряженные и «переломные» моменты его истории. На должностях инженеров и научных сотрудников за время существования организации сменилось более 40 человек; на должностях лаборантов и экскурсоводов (Кунгурская пещера и штат экскурсоводов входили в структуру стационара до 1969 г.) – более 90 человек [5]. Здесь функционировали гидрохимическая и спектральная лаборатории, фотолаборатория, сформировалась специализированная научная библиотека (около 7 000 источников). С 2004 г. в структуре стационара появился ведомственный музей карста и спелеологии (более 5 000 единиц хранения).

Несмотря на «академичность» работы в целом, сотрудников, имеющих ученую степень, в коллективе всегда было мало. Из руководителей это кандидат геолого-минералогических наук Д.В. Рыжиков и кандидат геолого-минералогических наук (с 1996 г. – доктор) В.Н. Андрейчук. За весь «советский» период в стационаре успешно защитили лишь две диссертации: Ю.А. Ежов в 1963 г. и С.Н. Волков в 1988 г. Ведущие сотрудники коллектива А.В. Турышев, В.С. Лукин, Е.П. Дорофеев и А.Д. Бураков по различным причинам до защиты диссертаций не дошли. В целом эта ситуация типична для провинциальной науки – «замкнутость» коллектива, ориентированного в основном на



Рис. 2. Коллектив стационара. 1982 г.

прикладные задачи (более 1 200 выданных экспертных заключений об условиях строительства и водоснабжения в карстовых районах, 1960–1980-е гг.), высокая загруженность повседневной текущей (в том числе экскурсионной) деятельностью, удаленность от основных научных центров СССР. На редкие всесоюзные научные конференции выезжали в основном руководители (В.С. Лукин и А.В. Турьшев), а в международных мероприятиях такого рода сотрудники стационара (в отличие от коллег из институтов центральных регионов страны [3]) не участвовали совсем, эта возможность появилась только в конце 1980-х гг.

В то же время в период с 1972 г. по начало 1990-х гг. стационар неоднократно выступал инициатором и организатором как региональных, так и всесоюзных совещаний и конференций, проводившихся в Перми и Кунгуре [10]. Активизация научной и экспедиционной деятельности, завязавшиеся международные связи стационара – несомненная заслуга В.Н. Андрейчука. При содействии сотрудников стационара в декабре 1988 г. появилась Ассоциация спелеологов Урала (АСУ). Ведь половину своей 75-летней истории Кунгурский стационар так или иначе был связан со спелеологическим движением, поскольку пещеры – общий объект исследований, профессионального и эстетического интереса, симпатий и забот как любителей (исследователей и спортсменов), так и геологов-карстоведов. Ассоциация появилась в то время, когда распадались и постепенно исчезали все структуры, координирующие (и контролирующие) спелеологическое движение бывшего СССР на общегосударственном уровне [3]. К этому времени единственным всеуральским спелеологическим мероприятием оставались традиционные Матчи городов Урала (соревнования по технике и тактике спортивного спелеотуризма).

К сожалению, этот короткий продуктивный период (конец 1980-х – самое начало 1990-х гг.) совпал с развалом СССР, после которого наступил затяжной кризис.

В это время резко сократился и полностью сменился штат сотрудников. Разработанный В.Н. Андрейчуком план по преобразованию лаборатории в профильный институт, как и проект строительства для него нового здания, остались на бумаге, а длительное отсутствие ремонта и обслуживающего персонала довели существующее здание до катастрофического состояния. Количество договорных работ и инженерно-строительных изысканий резко сократилось по причине глобального экономического кризиса постсоветской экономики. В этих условиях остро встал вопрос о спасении бесценной информации, хранящейся в фондах стационара, в том числе данных многолетних рядов наблюдений и экспериментов в Кунгурской пещере [10]. Начались спешные работы по их систематизации и переводу на цифровые носители [2].

Начало нового этапа в истории стационара, по сути, его возрождения, отмечено двумя удачными кадровыми назначениями: в 1998 г. научным руководителем стационара стал переехавший из Украины в г. Пермь доктор геолого-минералогических наук, проф. В.Н. Дублянский (рис. 3), а в 2001 г. зав. лабораторией была назначена О.И. Кадебская. Их многолетнее научное и практическое содружество приве-



*Рис. 3. В.Н. Дублянский, 2005 г.*

ло к стабилизации и дальнейшему позитивному развитию ситуации в Кунгурском стационаре в новом XXI столетии. В этот период кандидатские диссертации защитили О.И. Кадебская (в 2004 г.), Н.В. Лаврова (в 2005 г.), Д.В. Наумкин (в 2012 г.) и А.С. Казанцева (в 2022 г.). Главным событием 2017 г. стала защита О.И. Кадебской докторской диссертации, которая состоялась 1 июня в Пермском университете. Тема диссертации – «Минеральные и геохимические индикаторы природных процессов в подземных карстовых ландшафтах Урала». Защите предшествовали активные 10-летние полевые и исследовательские работы в пещерах Урала (от Приполярного до Южного, в том числе в пределах Казахстана). В истории Кунгурского стационара это лишь вторая (после В.Н. Андрейчука) докторская диссертация [11].

На сегодняшний день научный «багаж» стационара включает свыше 800 публикаций сотрудников (распределенных относительно равномерно: около 400 – в «советский» период до 1990 г., и столько же – после), более 200 отчетов по бюджетным и хоздоговорным темам, около 1 400 инженерно-геологических заключений (более 80% которых выдано в период планового бюджетного строительства в советское время). Результаты многолетних исследований обобщены в следующих монографиях: «Природа карста и основные закономерности его развития» (Рыжиков, 1954), «Наводнения в районе города Кунгура» (Ежов и др., 1990), «Терминология спелеологии» (Дублянский, Андрейчук, 1991), «Карст в земной коре: распространение и основные типы» (Ежов и др., 1992), «Классификация, использование и охрана подземных пространств» (Дублянский и др., 2001). В 1990 г. вышел в свет уникальный фотоальбом «Кунгурская Ледяная пещера» (Дорофеев, Андрейчук, 1990), до настоящего времени остающийся лучшим научно-популярным изданием о пещере. В 2005 г. опубликована монография, посвященная Кунгурской Ледяной пещере, признанная лучшей научно-исследовательской работой года.

В 2009 г. появилось богато иллюстрированное справочное издание «Геологические памятники природы Пермского края» (2009), для которого О.И. Кадебская, Н.В. Лаврова, Д.В. Наумкин и К.О. Худеньких подготовили 19 очерков, помещенных в трех тематических разделах. В 2013 г. опубликована монография «Криогенные минеральные образования Кунгурской Ледяной пещеры» (Андрейчук и др., 2013), посвященная актуальной тематике, находящейся на стыке нескольких научных направлений – минералогенезу в пещерных условиях. В 2017 г. вышли из печати две великолепных коллективных монографии: «Nurugene Karst Regions and Caves of the World» и «Ice Caves», в подготовке которых, наряду с множеством исследователей из десятков стран, принимала участие О.И. Кадебская. В 2019 г. опубликован фундаментальный «Атлас пещер России» (авторский коллектив – 99 исследователей, в т.ч. О.И. Кадебская и Н.В. Лаврова). Последняя тематическая монография – «Сульфатный карст Пермского края» (Максимович, Кадебская Мещерякова, 2021) – в 2023 г. переведена на английский язык.

В 2003, 2008, 2010 и 2014 гг. стационар публиковал сборники материалов конференций, организованных при его участии (в т.ч. III Международного симпозиума по пещерам с ледяными образованиями IWIC-III в 2008 г.). В дополнение к сборнику докладов конференции «Комплексное использование и охрана подземных пространств» (посвященной 100-летию юбилею экскурсионной деятельности в Кунгурской пещере, 2014 г.) подготовлен сборник, посвященный 100-летию со дня рождения В.С. Лукина, под общей редакцией О.И. Кадебской. В нем впервые были опубликованы письма В.А. Варсанофьевой и множество фотографий, являющихся сегодня экспонатами Музея карста и спелеологии, а также воспоминания целого ряда специалистов, близко знавших и работавших с В.С. Лукиным. Отдельно нужно отметить еще две монографии:



«Карст и строительство в районе Кунгура» (Лукин, Ежов, 1975) и «Геология и карст города Кунгура» (Катаев, Кадебская, 2010), в которых представлены результаты многолетних исследований карстовых процессов и явлений, раскрыто их значение для осуществления строительства на городской территории. Несмотря на то, что стационар так и не развился в масштабную инженерно-изыскательскую структуру, заслуги его коллектива в этой области несомненны. «Благодаря ему город стал многоэтажным», – так отзывались в Кунгуре о В.С. Лукине. В 1994 г. он был удостоен звания Почетного гражданина г. Кунгура [7].

Сегодня коллектив лаборатории-стационара работает так же, как при создании лаборатории, по основным научным направлениям – изучение карста и пещер.

После появления электронного микроскопа в Горном институте начались новые открытия. Впервые в мире описана морфология криогенного гипса и кальцита, которые образуются при медленном замерзании воды в пещерах. В сульфатных пачках пермского возраста найдены бораты – говлит, студеницит, пробертит, гидроборатит, а также результат их переотложений в пещере – улесит, иньонит, индерит. Также впервые в России описаны редкие пещерные минералы – рапидкрикит, бледит, лансфордит, икаит, гексагидрит, мирабилит и др. Впервые в России были описаны маркеры межледниковых периодов – кристаллы криогенного кальцита, которые образовывались в пещерах при оттаивании многолетнемерзлых пород, проведено их датирование и сопоставление результатов с международной шкалой климатических изменений до 700 тыс. лет (периоды плейстоцена и голоцена). За время экспедиций выявлено уже более 30 пещер в России, содержащих подобные уникальные отложения.

За двадцатилетний период проведено более сотни экспедиций в разные регионы Земного шара, где есть карст и пещеры. Наиболее интересные и плодотвор-

ные работы велись в Заполярье, на Ямале, где нами впервые описаны самые северные пещеры Урала, одну из которых мы назвали в честь юбилея Уральского отделения Академии наук – Академической. На Байкале, в пещерах, был описан новый вид колембол, которую мы назвали в честь известного исследователя карста Сибири – Ростислава Алексеевича Цыкина – колембола Цыкина. Впервые были проведены многолетние замеры температуры в 25 пещерах России в разных широтных зонах от Полярного Урала до границ Казахстана, крайней восточной точкой были пещеры Восточных Саян. Впервые нами были описаны криогенные минералы в пещере Дарк Стар (Узбекистан), Хээтей (Читинская область), Ая, Мечта и Байдинских (Иркутская область), Ледяной Папоротник (Казахстан), Ледяной пещере (республика Коми), Киндерлинской и Аскинской (Башкирия), Подарок (Оренбургская область) и в пещерах Мариинская, Кичменская Ледяная, Медео и Еранка (Пермский край).

За время работы мы успевали подать несколько заявок на создание новых охраняемых природных объектов, а также впервые описать уникальные объекты, требующие незамедлительной охраны в Пермском крае – Ординская пещера, Каменный город, Зуевский родник, Радоновый источник, озеро Кочь и др. Представлены проекты создания геопарка в пределах Кунгурского района, музеев горного дела на территории Егошихинского медеплавильного завода (г. Пермь) а также в Петровских каменоломнях (республика Крым).

Казанцева Алена Сергеевна успешно защитила в Москве кандидатскую диссертацию по теме «Изотопно-геохимические особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья».

В диссертации на основе комплексного анализа изотопного, макро- и микро-элементного состава вод были определены основные особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего

Предуралья и представлены концептуальные модели их формирования. Изменение изотопного состава источников происходит через 1–3 месяца после выпадения атмосферных осадков. Установлена широтная зональность распределения изотопов водорода и кислорода в подземных водах, распространённых в нижнепермских отложениях карстовых районов: состав вод утяжеляется, минерализация увеличивается при движении с севера на юг. Прослежено влияние литологического состава вмещающих пород на формирование изотопно-гидрохимического облика подземных вод.

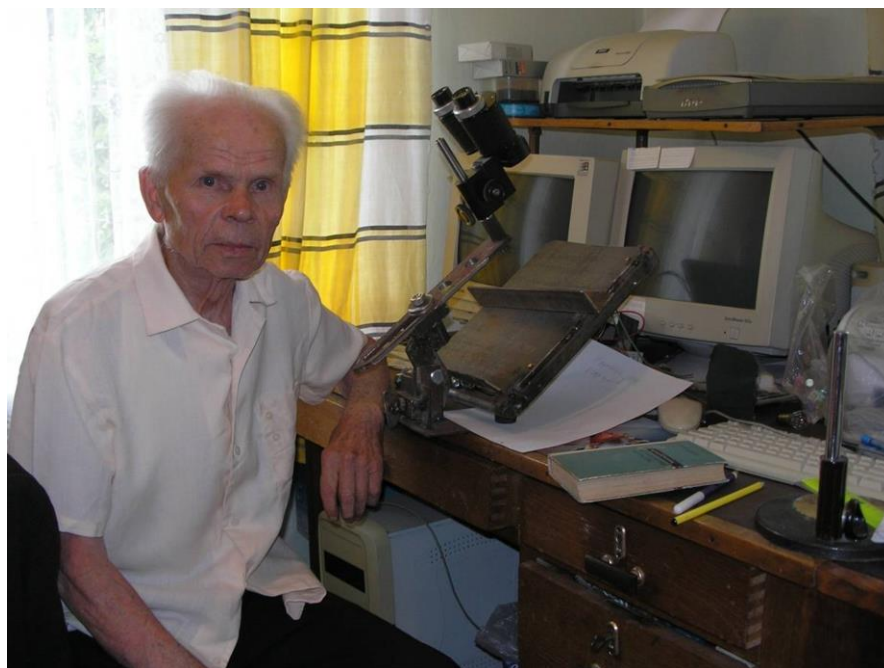
В этом году закончены многолетние исследования в самой длинной пещере Пермского края – Дивьей. Первая экспедиция стационара в эту пещеру состоялась в 1948 г. под руководством первого директора – Вячеслава Семеновича Лукина, все архивные материалы и результаты новой топографической съемки объединены в монографию, которая будет опубликована в 2023 г. Ну и конечно, не забываем про нашу природную лабораторию – уникальную Кунгурскую Ледяную пещеру. В прошлом году закончена новая съемка пещеры, длина ее возросла до 8 150 м. А.В. Красиков готовит кандидатскую дис-

сертацию по результатам новых данных. Международные связи стационара обширны и включают все страны, где есть пещеры и карст, наиболее активно общение ведется с коллегами из Института изучения карста и пещер в Словении, Чешским геологическим институтом (г. Прага), Словацким министерством по изучению пещер, Инсбрукским горным институтом. С итальянскими, румынскими, испанскими, сербскими, польскими, корейскими, японскими, китайскими, бразильскими, американскими и канадскими учеными также ведется активная переписка и обмен новыми результатами исследований. О.И. Кадебская является членом научного комитета международной ассоциации экскурсионных пещер мира (ISCA), а сотрудники лаборатории – членами Международной Академии исследований карста (International Academy of Karst Studies).

#### **Памяти А.В. Турышева (1928–2022)**

21 марта 2022 г. после непродолжительной болезни скончался Александр Васильевич Турышев (рис. 4), возглавлявший Кунгурскую лабораторию-стационар в период с 1959 по 1967 год. Ему было 93 года.

Александр Васильевич родился 7 августа 1928 г. в деревне Куликово Суксун-



*Рис. 4. А.В. Турышев дома, за рабочим столом, в день своего 90-летия*

ского района Пермской области в крестьянской семье. В годы Великой Отечественной войны учился в Суксунском педагогическом училище, которое окончил в 1947 г. В этом же году поступил на географический факультет Молотовского государственного педагогического института, который окончил в 1951 г. по специальности «География». Во время учебы в институте возглавлял научное студенческое общество на факультете. Уже тогда увлекался геологическими дисциплинами и два летних сезона участвовал в геологических экспедициях в Коми-Пермяцком национальном округе, занимаясь шпиховой съемкой в аллювиальных отложениях на его территории. Являлся именованным стипендиатом и окончил институт с красным дипломом. В 1951–1953 гг. работал в мужской средней железнодорожной школе № 4 станции Пермь. В 1953 г. перешел на научную работу в систему Академии наук СССР по профилю «гидрология и карстоведение» и переехал в Кунгур, став младшим научным сотрудником Кунгурского научно-исследовательского стационара УфАН СССР. Очень скоро он был назначен заместителем директора стационара (на тот момент Д.В. Рыжиков) и фактически возглавлял коллектив с 1955 г. В 1959 г. был официально утвержден в должности директора.

За время работы в стационаре А.В. Турышев опубликовал более 20 научных работ, десятки инженерно-геологических заключений и отчетов. Наиболее важные его публикации были посвящены подземным водам Кунгурской ледяной пещеры, их режиму и гидрохимии, а также вертикальной гидрохимической зональности карста. Его заслугой является строительство нового двухэтажного здания стационара (где он располагается и сейчас), а также сооружения всей существующей на припещерной территории инфраструктуры, где до этого не было ни электричества, ни подъездных путей. В соавторстве с коллегами (Д.В. Рыжиков, В.С. Лукин) он подготовил несколько вариантов популярных брошюр о Кунгурской пещере,

которые переиздавались большими тиражами более 8 раз. А.В. Турышев первым поднял вопрос о том, что стационар, осуществляя экскурсионную работу в пещере, занимается, по сути, несвойственной ему деятельностью (тратя на это материальные и интеллектуальные ресурсы), и подготовил обстоятельную записку о перспективах развития туризма в пещере, которые связывал с необходимостью существенного роста капиталовложений.

Александр Васильевич всегда интересовался пещерами как уникальными природными объектами. Среди его документов в фондах музея карста и спелеологии хранится письмо 1951 г., адресованное в Кунгурский стационар (куда он только собирался устроиться) с подробным описанием пещеры, которая сегодня носит имя В.А. Варсанофьевой (Кишертский район). При нем начались активные спелеологические исследования стационара как в окрестностях Кунгура, так и в других районах Урала. Довольно много сохранилось фотографий из башкирских экспедиций – сотрудники стационара в Мурадымовском ущелье; лагерь у Табынской пещеры. Интересовали Александра Васильевича и экскурсионные пещеры (поездки в Абхазию, в Новофонскую пещеру, и в Чехословакию, Моравский карст, Мацоха). Как заведующий он неоднократно представлял Кунгурский стационар на всесоюзных тематических конференциях и совещаниях (Ашхабад, Нижний Новгород (Горький) и др.).

В последующем А.В. Турышев трудился в системе «Уралгеоминвод» в качестве главного гидрогеолога и начальника этой геолого-разведочной организации. Закончил работать в восьмидесятилетнем возрасте в должности научного консультанта по гидрогеологии ЗАО «Уралнефтесервис». В его трудовой стаж входит и педагогическая деятельность, которую он считал очень важной (около 17 лет проработал учителем географии, астрономии, физики, в основном школе № 21 г. Кунгура). А.В. Турышев был ветераном Великой Отечественной войны (труженик тыла).

Как вспоминает дочь А.В. Турышева Татьяна Александровна, «папа был как «каменная стена» для нашей семьи и родственников: обязательный, порядочный, самостоятельный и уверенный к себе, увлеченный (не придавленный бытом и жизненными обстоятельствами), с энциклопедическими знаниями и, конечно, огромным интересом к науке и просто к жизни». Она отмечает его характерную черту – отношение к любой возникающей задаче или проблеме: решаемо все, нужно только думать и делать. Хочется отметить его большое уважение к физическому труду и прежде всего к сельскому крестьянскому труду.

Александр Васильевич поддерживал связи с бывшими коллегами, неоднократно бывал в Кунгурском стационаре, живо интересовался его работой. Его последняя публикация в «Пещерах» (в соавторстве с внучкой А.Ю. Скорняковой) вышла в 2018 г. А в гостях у него, в собственноручно построенном доме в пригороде Кунгура, в последний раз мы были в феврале 2022 г. Александр Васильевич был уже болен, но жаловался только на то, что совсем ослабло зрение, и он не может больше работать за компьютером...

### **Подземный космос.**

#### **Кунгурский стационар**

##### **и спелеологическое движение.**

#### **Ассоциация спелеологов Урала (АСУ)**

Ассоциация спелеологов Урала (АСУ) объединяет всех, кто так или иначе интересуется пещерами. Сегодня это представители шести регионов, множества городов и спелеоклубов Урала, в том числе старейших – СГС (г. Екатеринбург), «Плутон» (г. Челябинск), Пермского клуба спелеологов. В становлении регионального уральского объединения спелеологов сотрудники Кунгурского стационара определенно сыграли позитивную роль. Ассоциация появилась в то время, когда распались и постепенно исчезали все структуры, координирующие (и контролирующие) спелеологическое движение бывшего СССР на общегосударственном уровне [3]. И хотя в каждом из крупных региональных

центров Урала были яркие и харизматичные спелеологические лидеры (А.С. Вишневский в Екатеринбурге, С.М. Баранов в Челябинске, С.С. Евдокимов в Перми, Л.Н. Федотов в Оренбурге), все они сошлись на том, что необходимость в некоей объединяющей спелеологов всеуральской структуре есть! К этому времени единственным всеуральским спелеологическим мероприятием были традиционные Матчи городов Урала (соревнования по технике и тактике спортивного спелеотуризма). А вот связи между спортивным и научным направлением спелеологии стремительно рвались. Эту ситуацию попытался исправить В.Н. Андрейчук, сменивший в 1987 г. В.С. Лукина в должности заведующего Кунгурским стационаром.

Надо сказать, что сотрудники Кунгурского стационара сотрудничали со спелеологами и раньше. В фондах музея карста и спелеологии сохранилось множество документов и черно-белых фотографий на эту тему. Е.П. Дорофеев и Л.И. Крапивин нередко водили спелеогруппы в заозерную (в то время закрытую для массовых посещений) часть Кунгурской пещеры. В 1967–1969 гг. начались интенсивные исследования озер пещеры с использованием аквалангов. Эти работы проводились силами парней из Свердловской городской спелеосекции (СГС). Стационар обеспечивал размещение, вспомогательные работы и пр. Рукописные отчеты о проделанной работе (на имя В.С. Лукина) поступали в архив научной библиотеки, а сохранившаяся с тех времен переписка сегодня поставлена на учет в научно-вспомогательный фонд музея карста и спелеологии. В ходе тех работ были открыты новые, сильно обводненные гроты – Братский, Аквалангистов, им. 50-летия ВЛКСМ, но попутно выяснилось, что плавать с аквалангами в Кунгурской пещере особо негде – озера неглубокие и небольшие. Среди интересных фотографий тех лет – аквалангисты в озере грота Романтиков (снимков из других озерных гротов почему-то нет), а также веселые сюжеты о

встрече Нового 1974 г. – костюмированное шоу в пещере и застолье в стационаре, в котором принимали участие Л.И. Крапивин и патриарх пермской спелеологии, один из основателей Ассоциации, С.С. Евдокимов.

При В.Н. Андрейчуке тесные связи со спелеологами уральских клубов поддерживали сотрудники стационара И.А. Лавров, Н.В. Лаврова, И.И. Яцына, С.В. Толпышев. Изучать карст такого огромного по площади и интереснейшего по карстовой проблематике региона, как Урал, без данных о пещерах (подземной закарстованности) практически невозможно. В региональной (уральской) карстологии явно ощущалась потребность в осмыслении многочисленных, накопленных спелеологами, но разрозненных данных о пещерах региона, их вовлечении в научный оборот, а также использовании при решении практических вопросов, прежде всего, инженерного карстования (оценка карстовой опасности). Без спелеологов, их текущих исследований, а также материалов, которыми они располагают, невозможно обойтись при разработке комплексных вопросов карстовой науки и практики в регионе [1]. И вот в 1987 г. в Кунгуре состоялся первый семинар-совещание по вопросам дальнейшей совместной работы уральских спелеологов и сотрудников Горного института, в состав которого вошел Кунгурский стационар.

Как вспоминает В.Н. Андрейчук в статье, посвященной 20-летию АСУ [1], «...идею региональной координации следовало озвучить шире. Причем не только в аспекте сближения региональной спелеологии и науки, но и всей спелеологической деятельности, которой до этого занимались клубы практически (с небольшими исключениями) самостоятельно. Приятной неожиданностью оказалось то, что в разговорах на эту тему с председателями клубов, а также активными спелеологами региона, мне практически не пришлось никого специально убеждать. Конечно, опасения были. В спелеологию ведь идут (и задерживаются там), как

правило, люди не только любознательные, но и, мягко говоря, не лишённые амбиций... Поэтому им часто трудно договариваться между собой. Уральские клубы – серьёзные организации со своими традициями и несомненными достижениями, во многом «самодостаточные». Захотят ли они выйти из «удельных княжеств» на поле широкой кооперации? Но вопрос созрел, идея объединения уже витала в воздухе, и необходимо было ее только оформить формально и начать осуществлять. Решающую роль на этом этапе сыграли тогдашние председатели крупнейших уральских клубов – Екатеринбург (А. Вишневецкий), Перми (С. Евдокимов), Челябинска (С. Баранов)».

В декабре 1988 г. в Кунгуре состоялся организационный съезд уральских спелеологов. «Вот на этом-то совещании провозглашена была идея создания объединения спелеологов Урала, которое бы координировало работу секций, объединяло усилия в проведении различных мероприятий. Собрались в туркомплексе «Сталагмит», где половину пятого этажа гостиницы занимали кабинеты сотрудников стационара (финансирование науки в те годы позволяло). Пленарные заседания проходили в кинозале комплекса. Кулуары растянулись на все пять этажей, захватывая периодически и стоящее на отшибе старое здание стационара, пугая горничных, коридорных и просто отдыхающих. Самое интересное происходило, конечно же, здесь» [4].

Итогом работы стало создание организационного комитета под председательством В.Н. Андрейчука. Собравшаяся спелеологическая общественность приняла проект Устава Ассоциации спелеологов Урала и Условия проведения спелеолагерей Урала. До наших дней сохранился машинописный Устав на четырех страницах, с рукописной правкой текста В.Н. Андрейчуком, который сегодня является экспонатом музея карста и спелеологии. «Поскольку в советские времена любое любительское объединение должно было состоять при

(от) какой-нибудь государственной организации, говоря нынешним сленгом – должно иметь крышу (вот откуда привычка крышевать всех и все!), АСУ должна была работать при Кунгурском стационаре. Таким образом, Вячеслав Николаевич выступал еще и в немаловажной роли «крыши» Ассоциации; в подготовительный период был председателем оргкомитета; а на первом съезде АСУ избран вице-президентом АСУ» [4]. На должности вице-президента В.Н. Андрейчук оставался до 1992 г., когда его сменил И.И. Яцына, также сотрудник Кунгурского стационара. На этом же организационном съезде ответственным секретарем АСУ был избран И.А. Лавров, проработавший в этом качестве до 2005 г.

Из воспоминаний доктора геолого-минералогических наук В.Н. Андрейчука [1]: «Ассоциация возникла в период радикальных политических перемен в СССР. На фоне общего потепления международной политической обстановки активизировались контакты советских спелеологов с заграницей. Во время поездки в Италию, в 1988 г., на спелеофестиваль Фантаспелео (фактически – ежегодный съезд спелеологов Италии) я договорился с итальянскими и английскими спелеологами о начале сотрудничества – проведении совместных спелео-экспедиций. Уже через год «заработал» первый – среднеазиатский проект, опирающийся с уральской стороны на свердловский спелеоколлектив. После поездки А.С. Вишневого и других спелеологов в Лондон и Бристоль активизировались также контакты с англичанами, которые присоединились к уральским экспедициям в Среднюю Азию и в Сибирь. В регион были приглашены крупнейшие зарубежные карстоведы и спелеологи – президенты (в свое время) Международного Спелеологического Союза (UIS) Паоло Форти (Италия), Дерек Форд (Канада), Адольфо Эразо (Испания), а также другие специалисты. К участию в региональных и международных проектах Ассоциации подключились также некоторые другие известные в СССР спе-

леологи: В. Киселев, В. Комаров и др. Не будет преувеличением утверждение, что в то время собственно Урал был спелеологическим «фокусом» России...».

Помимо свердловчан из СГС (среди которых был и поэт Илья Кормильцев, автор текстов гремевшего по всей стране «Наутилуса»), в среднеазиатской экспедиции участвовали сотрудники Кунгурского стационара И.И. Яцына и С.В. Ширинкин. Ивана Яцыну привез в стационар В.Н. Андрейчук с Западной Украины. В 1984 г. он окончил Каменец-Подольский индустриальный техникум по специальности «Поиск и разведка месторождений полезных ископаемых» и с осени 1988 г. начал работать в стационаре на должности старшего техника. Тогда же Иван поступил на заочное отделение Пермского университета (геологический факультет). Открытый и дружелюбный украинец легко вписался в коллектив, где пользовался всеобщим расположением, всегда был «душой компании». Его высоко ценила и всячески опекала К.А. Горбунова (ПГУ), в соавторстве с которой он опубликовал несколько работ [8]. После отъезда из Кунгура В.Н. Андрейчука И.И. Яцына исполнял обязанности заведующего стационаром. В 1999 г. он утонул в р. Сылве.

Интересно, что по дорогам Средней Азии интернациональный спелеоколлектив перемещался на машине Кунгурского стационара – ГАЗ-66 (рис. 5). В роскошном издании, опубликованном итальянцами по результатам этой экспедиции, на странице 26 есть фотография нашей машины на фоне среднеазиатских пустынь [19]. Эту книгу (на итальянском языке) позднее подарил музею карста и спелеологии доктор геолого-минералогических наук В.Н. Дублянский. Еще в фондах музея имеется подборка черно-белых фото (участники экспедиции – итальянцы, англичане, русские, в том числе и И.И. Яцына, который внешне был весьма похож на итальянца; ослики, горные кишлаки, экзотическая природа гор Средней Азии), а также минералогические образцы (рис. 6).

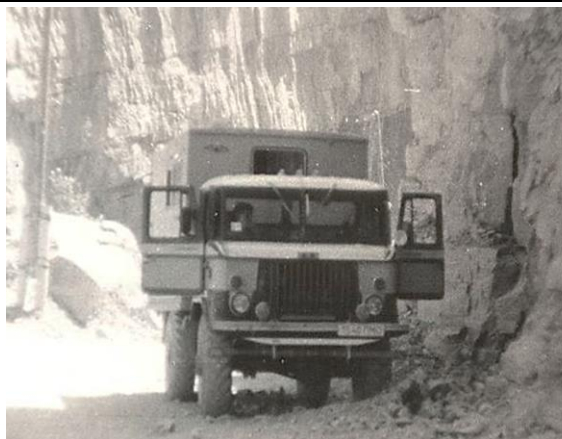


Рис. 5. Экспедиция стационара по изучению пещер Таджикистана. Кишлак Чуль-Баир. 1990 г.

Организационное оформление Ассоциации спелеологов Урала подтолкнуло издательскую деятельность спелеологов. Конечно, многие из них публиковали результаты своих исследований и раньше (особенно этим отличается С.М. Баранов). Но все же стоит отметить целую серию публикаций, появившихся в начале 1990-х гг. в результате успешного сотрудничества спелеологов и академической науки: сборники и монографии «Вопросы Уральской спелеологии» (Пермь, 1989) и «Изучение Уральских пещер» (Пермь, 1992), «Терминология спелеологии» (Кунгур, 1991), «Пещеры Урала и Приуралья» (Пермь, 1992). Новая информация о пещерах публикуется в специализированном сборнике «Пещеры». Многие спелеоклубы издают сегодня свои печатные материалы, а С.С. Евдокимов организовал регулярный выпуск «Журнала АСУ». Изданы великолепные альбомы, посвященные истории Свердловской городской спелеосекции [6, 16], истории челябинской спелеологии [18].

В 2018 г. в Кунгуре прошел XXX юбилейный съезд АСУ. В рамках посвященной этому конференции «Подземные пространства: методы изучения, мониторинг, охрана и использование» было заслушано более 30 докладов. Среди делегатов присутствовали «отцы-основатели» АСУ – С.С. Евдокимов (Пермь), С.М. Баранов (Челябинск), состоялся последний публич-



Рис. 6. Яцына И.И. у входа в пещеру Оптимистическая (Западная Украина). 1988 г.

ный доклад А.В. Турышева (возглавлял стационар в 1959–1967 гг.). Материалы конференции опубликованы в сборнике «Пещеры» за 2018 г. Сергей Сергеевич Евдокимов передал музею карста и спелеологии свою коллекцию значков (30 единиц). Среди них особую историческую ценность представляют самодельные авторские значки, изготовленные им для II Матча городов Урала, проходившего 14–16 сентября 1977 г. в г. Губаха. Эта коллекция стала существенным дополнением к авторским собраниям тематической фалеристики, хранящейся и экспонирующей в музее карста и спелеологии.

#### **«Музей пещеры» (Музей карста и спелеологии Горного института УрО РАН)**

В 1955 г. с территории припещерного комплекса Кунгурской Ледяной пещеры в центр Кунгура был выведен Кунгурский краеведческий музей. С этого времени неоднократно предпринимались попытки организовать при пещере собственный «пещерный» (геологический, спелеологический) музей.

Особенно ясно понимали необходимость подобного музея руководители и сотрудники Кунгурского стационара, в ведении которого до 1969 г. находилось экскурсионное обслуживание посетителей пещеры. Упоминания о «музее пещеры» неоднократно встречаются в архив-

ной документации стационара. Работая в самых разных уголках страны, сотрудники (Е.П. Дорофеев, Л.И. Крапивин, В.С. Лукин) собрали для будущего музея представительную коллекцию геологических и минералогических образцов. Однако и финансовые, и материальные, и технические возможности стационара в этой сфере были явно недостаточны. Главной проблемой было отсутствие подходящего помещения, а также загруженность коллектива текущей хозяйственной и научной работой. Кроме того, ни у кого из них не было опыта музейной работы.

После ввода в эксплуатацию туркомплекса «Сталагмит» (25 мая 1983 г.) в новом здании гостиницы заведующая Кунгурским экскурсбюро Г.Н. Никитина и директор стационара В.Н. Андрейчук смогли получить помещение для организации выставочного зала. Экспонировались в нем в основном геологические образцы Е.П. Дорофеева и В.Н. Андрейчука. Музей не имел официального статуса, учетная работа не велась, что, в конечном счете, и определило недолгое существование этого музейного проекта, а также и утрату большей части экспонируемого материала.

В 1990-е годы вся сложившаяся в советское время припещерная инфраструктура пришла в полный упадок. Количество посетителей пещеры в середине 1990-х годов упало до уровня 1960 г. Разработанный В.Н. Андрейчуком план перестройки и модернизации припещерного комплекса, включавший строительство постоянной музейной экспозиции в здании лаборатории у входа в пещеру, не был реализован. Реанимировать идею попытался в начале 1990-х годов В.Н. Конов, возглавлявший временную дирекцию проектируемого национального парка «Сылвенский», однако острый недостаток средств, да и общая неопределенная ситуация вокруг создаваемого парка, не позволили ее реализовать. Таким образом, в течение XX столетия «пещерный» музей у Кунгурской пещеры создать не удалось.

Ситуация изменилась в конце 1990-х гг., когда резко сократился штат Кунгурского стационара, исчезли машбюро и гидрохимическая лаборатория, и в здании образовались значительные пустующие площади. В 2005 г. после капитального ремонта в двух залах на первом этаже общей площадью около 100 м<sup>2</sup> разместился музей карста и спелеологии, получивший название в соответствии со специализацией лаборатории. В одном зале работает стационарная выставка горных пород и минералов, в другом – постоянная экспозиция, рассказывающая о карсте и пещерах. Значительная часть ее посвящена истории Кунгурского стационара, существующего у пещеры с 1948 г.

Тематико-экспозиционный план был разработан Д.В. Наумкиным в 2005 г., и сегодня он (с незначительными изменениями) воплощен в постоянной экспозиции музея. Посещение музея является логичным завершением туристической экскурсии по пещере, во время которой экскурсанты получают некоторые сведения о карсте и карстовых процессах.

Музей карста и спелеологии – классический академический музей. Для его оформления широко используются натурные экспонаты – минералогические и палеонтологические образцы, карстующиеся породы, вторичные минеральные образования карбонатных, гипсовых и соляных пещер. В экспозиции представлены макеты («Гидродинамическая вертикальная зональность закарстованного массива», выполнен по рисунку доктора геолого-минералогических наук Г.А. Максимовича, авторы – Д.В. Наумкин, К.О. Худеньких, И.Н. Федосова; «Использование человеком пещер в эпоху палеолита», автор – член Союза художников РФ Т.Ю. Нелюбина). Применяется и такой прием показа экспонатов, как интерьер – демонстрируется условный интерьер рабочего кабинета В.С. Лукина, возглавлявшего Кунгурский стационар с 1967 по 1986 гг. В нем представлены подлинные предметы мебели и различные мелкие детали, не имеющие, конечно, особой исторической цен-



ности, но происходящие из реального кабинета В.С. Лукина, находившегося на месте нынешнего музейного зала.

Всего в настоящее время на музейный учет поставлено 5 642 единицы хранения. Фондовая основа включает коллекции основного фонда (2 424 ед. хр.) и научно-вспомогательного фонда (3 218 ед. хр.). Среди фондообразователей представлены имена выдающихся отечественных геологов-карстоведов; доктора геолого-минералогических наук В.А. Варсанофьевой, доктора геолого-минералогических наук Г.А. Максимовича, В.С. Лукина, доктора геолого-минералогических наук В.Н. Дублянского. Их личные фонды включают фотографии, рукописи, переписку, книги, брошюры, а также личные вещи, имеющие отношение к тематике музея. Основу собрания каменного материала заложил бывший сотрудник Кунгурской пещеры Л.И. Крапивин, подаривший музею свыше 500 минералогических образцов. Множество экспонатов собрано сотрудниками Кунгурского стационара (О.И. Кадебская, Н.В. Лаврова, М.С. Пятунин, К.О. Худеньких, П.Н. Сивинских, О.И. Осетрова), в т.ч. полевые сборы из пещер Урала, ставшие натурной основой докторской диссертации О.И. Кадебской. Мемориальное значение имеют сегодня коллекции Е.П. Дорофеева.

Наиболее представительные коллекции музея – коллекция минеральных образований карбонатных пещер [12, 14], коллекция образцов карстующихся пород, в т.ч. гипса [9], коллекция художественных изделий (мелкая пластика) из поделочных сортов гипса, палеонтологическая коллекция [13], собрание путеводителей и буклетов из самых разных экскурсионных пещер мира, коллекция календарей, календариков и плакатов с пещерной тематикой. Уникальный экспонат – французская гравюра «Plan de la Grotte de Kungur», изготовленная в Париже в 1779 г. Она служила иллюстрацией второго издания «Всеобщей истории путешествий...» аббата Прево, и именно в этом многотомном издании

помещалась в XXIV томе на 128 стр. Гравюра была приобретена Горным институтом на аукционе в г. Минске в 2005 г.

В отличие от большинства ведомственных музеев, доступ в которые для туристов затруднен либо вовсе невозможен, музей карста и спелеологии активно посещается. Сегодня, судя по далеко не полным статистическим данным, его посещаемость сравнима по уровню с посещаемостью муниципальных музеев г. Кунгура. Сейчас он пользуется большой популярностью у туристов и туроператоров, которые регулярно бывают в Кунгурской пещере. Это свидетельствует о его очевидной востребованности. В 2015 г. начал полноценно функционировать лекционный зал, оборудованный демонстрационной техникой, и сегодня в музее карста и спелеологии можно организовать лекции и просмотр полнометражных фильмов на разнообразную естественно-научную тематику. Подобные мероприятия проводятся только по предварительным заявкам.

Экскурсионную работу в музее ведет лаборант О.И. Осетрова. Ей свойствен творческий подход к делу, умение найти язык с самой разной аудиторией, от школьников начальных классов до профессора-геолога. Живой общительный характер превращает ее экскурсии в «театр одного актера». Благодаря ей сложился круг «постоянных клиентов» – посетителей, которые бывали в музее неоднократно (до 7–10 раз!). Многие туроператоры заказывают для своих групп непременно и именно Ольгу Ивановну.

О.И. Осетрова работает в музее с 2005 г. Профильного образования у нее нет, она закончила Московский историко-архивный институт. Но благодаря любознательности, вполне освоила музейную тематику и легко общается с профессионалами на карстологические или минералогические темы. Уже давно она стала «своей» в специфической тусовке минералогов, камнерезов и любителей камня на выставке «Минерал-шоу» в Екатеринбурге, которая является одним из источ-



Рис. 7. Карьер Соболя (г. Красноуфимск).  
О.И. Осетрова в поисках геликоприона. 2018 г.

ников пополнения наших коллекций. Кроме того, она очень легка «на подъем», ее энергии можно позавидовать, и неоднократно выезжала в полевые экспедиции для самостоятельного сбора экспонатов. География поездок – от Архангельской обл. и республики Коми до Южного Урала (Башкирия и Челябинская обл.). Тесные дружеские отношения связывают ее и с сотрудниками центра научных музеев системы РАН, например, с кандидатом геолого-минералогических наук С.К. Пухонто (Геологический музей им. В.И. Вернадского).

Осенью 2007 г. мы принимали участие в научно-практической конференции «Изучение, сохранение и использование объектов геологического наследия северных регионов», которая проходила в г. Сыктывкаре, в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН. Организаторы конференции предоставили нам возможность побывать на полевых экскурсиях в самом центре республики Коми, в Ухтинском и Сосногорском районах, где на сравнительно небольшой территории сосредоточено множество разрезов и обнажений верхнедевонского возраста, некоторые из

которых имеют статус памятников природы. Привезенные образцы составили хорошую тематическую коллекцию девонской фауны, которой раньше не было в фондах музея. Сбором материалов занимались научные сотрудники К.О. Худеньких и Д.В. Наумкин, лаборант О.И. Осетрова и водитель А.А. Запольских. Эта поездка описана Ольгой Ивановной в отдельной публикации [15].

В 2011 г. на базе Пинежского заповедника состоялась Международная конференция «Карстовые системы Севера в меняющейся среде». Она также сопровождалась полевой экскурсионной программой, во время которой О.И. Осетрова отобрала образцы гипса из пещер Киселевская, Хрустальная и им. В.С. Высоцкого.

Конференция в Уфе «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий» (2016 г.) завершилась поездкой на знаменитые Стерлитамакские шиханы; неоднократные поездки в Миасс и Сатку (Челябинская обл.) также хорошо дополнили фонды музея. Много раз состоялись полевые выезды в гостеприимном Красноуфимске (рис. 7), где мы собирали разнообразную морскую фауну нижней Перми. Последняя поездка (с участием доктора геолого-минералогических наук С.В. Наугольных) в окрестности г. Губаха завершилась сборами рифовой фауны девона. Нужно отметить, что Ольга Ивановна всегда основательно готовится к таким поездкам, подбирая и снаряжение, и упаковочные материалы, и вкусную еду для полевого «перекуса». Нашему «камерному» музею карста и спелеологии очень повезло, что в свое время она решила прийти сюда на работу. Пользуясь случаем, мы всем коллективом лаборатории-стационара от всей души поздравляем Ольгу Ивановну Осетрову с ее 70-летним юбилеем, который она отметит в этом году!

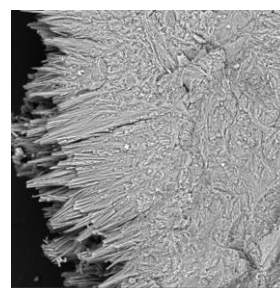
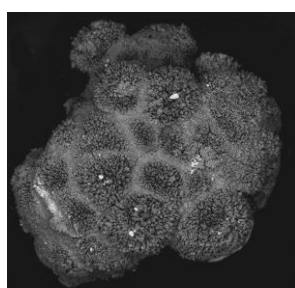
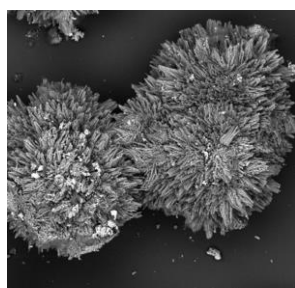
18-летняя история существования музея карста и спелеологии логично вписалась в текущее развитие музейной сферы

Кунгура, который медленно, но верно превращается в один из крупнейших центров въездного туризма не только Пермского края, но и всего Урала. Удачное расположение возле знаменитой Кунгурской Ледяной пещеры (рис. 8–10) обеспечивает постоянный приток

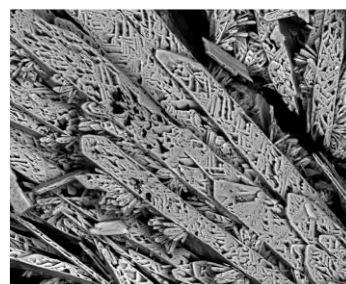
посетителей и делает музей карста и спелеологии самодостаточным в плане дальнейшего развития и совершенствования экспозиций и интерьера, что крайне редко встречается в практике функционирования ведомственных музеев.



*Рис. 8. В гроте Крестовый, Кунгурская Ледяная пещера*



*Рис. 9. Морфология выделений улуксита в Кунгурской Ледяной пещере*



*Рис. 10. Морфология кристаллов гипса с несколькими генерациями, образованных при медленном замерзании растворов: слева – общий вид кристаллов, справа – внутреннее каркасное строение кристаллов*

**Библиографический список**

1. *Андрейчук В.Н.* Начала // Журнал АСУ. – 2009. – № 26: 20 лет Ассоциации спелеологов Урала. – С. 5–8.
2. *Андрейчук В.Н., Дублянский В.Н.* Сотрудники стационара и Кунгурская ледяная пещера // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. – Пермь, 2003. – С. 112–124.
3. *Дублянский В.Н.* Пещеры и моя жизнь. – Пермь: ПГУ, 2006. – 268 с.
4. *Евдокимов С.С.* Свидетельство очевидца // Журнал АСУ. – 2009. – № 26: 20 лет Ассоциации спелеологов Урала. – С. 12–16.
5. *Кадебская О.И., Лаврова Н.В.* История Кунгурского стационара в документах // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. – Пермь, 2003. – С. 104–112.
6. *Кулешова С.* От Светлой – к 1500! 45 лет Свердловской городской спелеосекции. – Екатеринбург: Квист, 2006. – 134 с.
7. Лукин Вячеслав Семенович: Сб. статей, посв. 100-летию со дня рождения В.С. Лукина / под общ. ред. *О.И. Кадебской*. – Пермь: ПГНИУ, 2014. – 198 с.
8. *Максимович Н.Г.* Клара Андреевна Горбунова и Кунгурская ледяная пещера // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. – Пермь, 2003. – С. 125–132.
9. *Наумкин Д.В.* Гипс в коллекциях и экспозиции музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН // Горное эхо. – 2020. – № 2. – № 79. – С. 10–16.
10. *Наумкин Д.В.* Кунгурской лаборатории-стационару ГИ УрО РАН – 60 лет // Инженерная геология. – 2008. – № 3. – С. 68–75.
11. *Наумкин Д.В., Лаврова Н.В.* 70 лет на службе науке и культуре // Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 97–100.
12. *Наумкин Д.В., Осетрова О.И.* Кальцитовые минеральные образования пещер в фондах музея карста и спелеологии ГИ УрО РАН (обзор коллекции) // Пещеры. – Пермь: ЕНИ ПГНИУ, 2016. – Вып. 39. – С. 68–72.
13. *Наумкин Д.В., Осетрова О.И.* Палеонтологическая коллекция Музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН. Создание постоянной выставки // Грибушинские чтения-2019. Кунгурский диалог. – Пермь: изд. Богатырев П.Г., 2019. – С. 513–519.
14. *Наумкин Д.В., Осетрова О.И., Богомаз М.В.* Кальцитовые минеральные образования карбонатных пещер в фондах музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН // XXI Всерос. науч. чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова. – Миасс: ИМин ЮУ ФИЦ МиГ УрО РАН, 2020. – С. 138–146.
15. *Осетрова О.И., Наумкин Д.В.* Тиманская коллекция в фондах музея карста и спелеологии Горного Института Уральского Отделения РАН // Палеоэкология. Методологические основы, фактологический потенциал, применение в музейных экспозициях. – М.: Медиа-Гранд, 2017. – С. 18–21.
16. СГС в центре кадра: фотоальбом, посвященный истории Свердловского городского спелеоклуба. – М.: Буки-Веди, 2016. – 224 с.
17. Челябинская спелеология – 50 лет: люди, события, факты / сост. *С.М. Баранов*. – Челябинск: Абрис, 2018. – 504 с.
18. *Grotte e storie dell'Asia Centrale.* Padova: Tipolitografia TURRA Snc., 1992. – 310 p.

**Сведения об авторах**

*Наумкин Дмитрий Владимирович*, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: calliore28@mail.ru

*Кадебская Ольга Ивановна*, доктор географических наук, заведующий Кунгурским стационаром, «ГИ УрО РАН» e-mail: icescave@bk.ru

Материал поступил в редакцию 08.02.2023 г.

# ***ПОРТРЕТ УЧЕНОГО***



## А.Е. КРАСНОШТЕЙН – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК

А.А. Барях, Горный институт УрО РАН

Г.З. Файнбург, Горный институт УрО РАН;

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**Для цитирования:**

Барях А.А., Файнбург Г.З. А.Е. Красноштейн – ученый и человек // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 85–92. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.9>

Эта статья – воспоминания о горном инженере, докторе технических наук, профессоре, члене-корреспонденте Российской академии наук Аркадии Евгеньевиче Красноштейне (рис. 1) – основателе и первом директоре Горного института УрО РАН.

Не зря перечисление всех регалий Аркадия Евгеньевича мы начали с «горного инженера» – этим званием он всю жизнь гордился больше всего! А предшествовал получению специальности горного инженера далекий 1954 год, когда запросы угольной (Кизеловский угольный бассейн) и калийной промышленности Западного Урала (Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей) привели к созданию в Перми (тогда Молотове) нового высшего учебного заведения – Горного института.

В команде педагогов и ученых, приехавших из Ленинградского горного института, были два человека – ректор института Михаил Николаевич Дедюкин и будущий Учитель А.Е. Красноштейна Иннокентий Иннокентьевич Медведев, которые в последствии сыграли исключительно важную роль в жизни Аркадия Евгеньевича и становлении его как ученого, педагога и организатора науки. Но это было впереди...

Еще один штрих судьбы был отмечен в 1955 году, когда на учебу в Горный институт пришли три юноши – Аркадий Красноштейн, Лев Папулов и Вячеслав



Рис. 1. Аркадий Евгеньевич Красноштейн

Фоминых. Они подружились. Первый из них стал ученым и лидером Пермской школы аэрологии, второй – главным инженером производственного объединения «Уралкалий», третий – заместителем начальника Управления Пермского округа Госгортехнадзора СССР. Такое сочетание науки, производства и надзора за безопасным ведением горных работ позволило продвигать многие инновационные идеи, выдвигаемые А.Е. Красноштейном, в практику проветривания Верхнекамских калийных рудников.

А практика была сложной... Все горные работы велись тогда буровзрывным способом. Это был основной способ добычи полезных ископаемых на многочис-

ленных угольных и рудных месторождениях. Калийных рудников на территории СССР в 60-е годы фактически было два – один в Соликамске и один в Березниках (небольшие рудники в Калуше и Стебниках на Западной Украине можно было не принимать в расчет). В этой связи неизбежно пермские ученые должны были стать пионерами исследований процессов проветривания в калийных рудниках.

Если характер проветривания выработок с небольшими сечениями был примерно одинаков на всех типах шахт и относительно изучен на рудных и угольных шахтах, то выработки большого сечения (порядка 100 м<sup>2</sup>) с большим количеством одновременно взрываемого ВВ (порядка 700 кг) были характерны только для новых высокопроизводительных технологий Верхнекамских калийных рудников.

Эту сложную (с позиции проветривания) тематику поручили молодому ассистенту А.Е. Красноштейну, в 1960 году окончившему институт и оставленному работать в Политехническом институте на кафедре «Охраны труда и рудничной вентиляции» (рис. 2).

Это потребовало от молодого горного инженера освоения методов физического моделирования аэродинамических процессов с помощью модных тогда гидромоделей, а также овладения техникой решения дифференциальных уравнений в частных производных. Для восполнения

нехватки математических знаний Аркадий Евгеньевич целый учебный год посещал лекции на мехмате Пермского государственного университета.

А помимо того, он «впитывает в себя» самые замечательные черты своего Учителя – И.И. Медведева: «Его достоинство Учителя, – писал в своих воспоминаниях сам Аркадий Евгеньевич, – состояло не только в широте и глубине специальных и общечеловеческих познаний, не только в количестве уделяемого нам времени, не только в искрометном остроумии, юморе и других профессиональных и личностных качествах, которыми он был щедро наделен природой, а скорее всего, в неповторимом обаянии личности, которое от него исходило, в удивительном умении в любом обществе, любом коллективе немедленно становиться центром притяжения...» (рис. 3).

Он считал, что этому невозможно научиться, но он научился, ибо сам ко всему этому был способен, был одарен и умел трудиться над собой. Все эти вышеприведенные слова можно сказать и об Аркадии Евгеньевиче.

В 1967 году А.Е. Красноштейн успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование проветривания камер большого объема в условиях Верхнекамских калийных рудников» (рис. 4).

А в это время началось перевооружение калийных рудников, постепенная замена буровзрывного метода отбойки руды



Рис. 2. Обсуждение вопросов развития политехнического института



Рис. 3. Профессор И.И. Медведев

с большим обилием ручного труда на более прогрессивные технологии с использованием самоходного оборудования – буровых кареток и погрузочно-доставочных машин с двигателями внутреннего сгорания. Одновременно начался переход на комбайновую выемку. Это поставило новые задачи перед рудничным проветриванием. Решением этих задач и занялся Аркадий Евгеньевич.

Десять лет напряженной работы и фундаментальный труд «Научные основы процессов формирования и нормализации аэрозольного и газового состава атмосферы калийных рудников» (докторская диссертация) успешно защищен в 1978 году в Ленинградском горном институте. Получив степень доктора технических наук, А.Е. Красноштейн становится заведующим кафедрой «Охраны труда и рудничной вентиляции».

Вот здесь-то свое видение места и роли А.Е. Красноштейна проявил ректор Политеха Михаил Николаевич Дедюкин. В те годы горный факультет был одним из отстающих и традиционно занимал нижние строчки в социалистическом соревновании. Это не устраивало М.Н. Дедюкина, горняка до мозга костей. Он назначил А.Е. Красноштейна на должность декана горного факультета (рис. 5).

И вот Аркадий Евгеньевич со свойственной ему энергией занялся преобра-

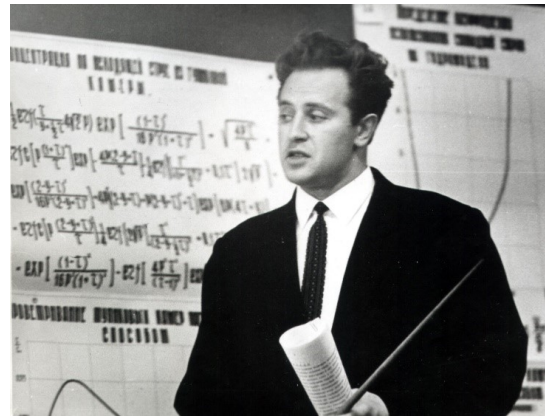


Рис. 4. Защита кандидатской диссертации

зованием факультета из отстающего в лидирующий. Учеба, материальное обеспечение кафедр, улучшение условий жизни студентов в общежитиях, развитие спорта, художественной самодеятельности и другие атрибуты системы соцсоревнования – все оказалось в поле неутомимой деятельности и творческой активности нового декана. Широта задач была по плечу А.Е. Красноштейну. Он умел и заставить работать, и увлечь работой... Через несколько лет факультет преобразился – стал лидером Политеха. И, что особенно поражало, декан нашел много союзников именно в лице особо «отчаянных» студентов (рис. 6).



Рис. 5. Первый ректор Пермского политеха – Михаил Николаевич Дедюкин





Рис. 6. Выступление декана горного факультета профессора А.Е.Красноштейна

Серьезный ученый, он был доброжелателен, внимателен и коммуникабелен, он пел, на память зная несметное количество песен, красиво танцевал, писал интересные стихи, гонял на моторке по Камскому морю, с огромным удовольствием парился в бане, занимался моржеванием, не чурался играть со студентами в футбол, объездил места практик студентов-горняков, раскинутых по бескрайним просторам Советского Союза. Молодой, красивый, умный, он привлекал людей и мог организовать их в единую команду.

Уже тогда восхищала в нем способность принять на себя всю полноту ответственности в любых сложных ситуациях. Если он принимал то или иное решение, зачастую не разделяемое другими, но верное, он шел всегда до конца, касалось ли дело покупки уникального комплекта инструментов для духового оркестра или не отчисления студента, попавшего в медвытрезвитель.

Весной 1986 года на Верхнекамском месторождении произошла масштабная горнотехническая авария: был затоплен крупнейший в СССР и Европе Третий Березниковский калийный рудник. На повестку для обеспечения безопасности ведения горных работ встал вопрос разработки новых методов и подходов к защите калийных рудников от затопления. Стало ясно, что калийная отрасль нуждается в фундаментальной науке (рис. 7).

И опять судьба, а возможно, счастливое стечение обстоятельств. В 1987 году началось преобразование Уральского научного центра АН СССР в Уральское от-



Рис. 7. Обсуждение проблем калийной промышленности. Рядом с А.Е. Красноштейном – главный инженер ПО «Уралкалий» Л.М.Папулов

деление АН СССР, которое сопровождалось созданием региональных научных центров и академических институтов. В качестве одного из таких центров была выбрана Пермь, где к этому времени уже работали два академических учреждения.

Возникла идея организации академического института горно-геологического профиля, способного на высоком научном уровне решать проблемы Верхнекамских рудников. Ее реализация была поручена уже известному ученому-горняку А.Е. Красноштейну. Не без сомнений он взялся за этот гуж, но не в стиле Аркадия Евгеньевича было не сдюжить. Все свои таланты и организаторские способности А.Е. Красноштейн приложил для успешного решения этой задачи. Создание Горного института стало главным делом его жизни, несмотря на все сложности и перипетии этого процесса (рис. 8).



Рис.8. Здание горного института УрО РАН, 1988 г.

Аркадий Евгеньевич по крупицам собирал свою команду, формируя эффективный научный коллектив, одновременно решая вопросы помещений, оборудования и т.п. Именно в Горном институте УрО РАН в полной мере проявились его могучий организаторский талант, его смелая научная мысль, личное обаяние. Аркадий Евгеньевич был не только идейным организатором, но и фактическим исполнителем постоянных строек – находил и привлекал инвестиции, был директором, ученым, завлабом, финансистом, каменщиком, прорабом...

Двадцать лет успешного директорства – все с нуля, через кризисы и передраги перестройки в стране к созданию сплоченного научного коллектива, к «строительству» в прямом и образном смысле слов институ-

та, «нашего дома», как любил говорить Аркадий Евгеньевич. И институт в самом деле был для него домом, который все время рос и расширялся, наполнялся новыми, преимущественно молодыми людьми, формировавшимися в прекрасных специалистов (рис. 9–10).

Директор – это всегда выраженное единоначалие. Вместе с тем у А.Е. Красноштейна оно сопровождалось полной демократией. Любой сотрудник в любое время мог войти в кабинет директора, позвонить рано утром или поздно вечером. Аркадий Евгеньевич был открыт для людей. К нему шли не только по производственным вопросам, но зачастую – с грузом личных проблем. И Аркадий Евгеньевич вникал, советовал, помогал.



Рис. 9. Отчет о научной и научно-организационной деятельности института, 1998 г.



Рис. 10. Руководство Горного института УрО РАН, начало 90-х гг.

Именно душевные качества Аркадия Евгеньевича определяли его успехи в научной и организаторской деятельности. Он любил апробировать ответственные решения на своих подчиненных. И, когда ему возражали, горячо убеждал в необходимости того или иного действия. Был очень доволен, если ему удавалось перетянуть оппонента на свою сторону. Но если Аркадию Евгеньевичу аргументировали свое несогласие, задумывался и отказывался от своего первоначального решения. Хотя чувствовалось, что это давалось ему с трудом.

А.Е. Красноштейн обладал блестящим стратегическим даром. В лихие 90-е годы, когда молодой, еще не вставший на ноги, институт остался без современного научного оборудования, без возможности платить достойную зарплату, а надо было «вклиниваться» в горную академическую среду, он определил принципиально новый вектор развития горных наук, основанный на комплексном использовании всех наук о Земле (и не только) в решении горнотехнических проблем. Так в институте, наряду с горняками, появились геофизики, геологи, механики, физики и математики. По сути, этот подход был прообразом, сейчас широко афишированного, междисциплинарного направления научных исследований.

И еще один пример. Покинув вузовскую науку, Аркадий Евгеньевич не хотел расставаться с высшим образованием.

Многих трудов стоило ему перепрофилировать кафедру «Разработка месторождений полезных ископаемых» в вузовско-академическую структуру. Неформально сейчас кафедра является одним из подразделений Горного института, и мы уже много лет «питаемся» плодами этого мудрого решения. Студенты-горняки с первых курсов начинают приобщаться к институтским лабораториям. Лучшие из них остаются работать в институте, защищают кандидатские и уже даже докторские диссертации.

Аркадий Евгеньевич был не только замечательным профессионалом, но и удивительно многогранным, интересным и открытым человеком. Как-то на волгоградском рынке, очарованная им, словоохотливая продавщица-южанка восхищенно сказала: «Какой просторный мужчина!» И Аркадий Евгеньевич в самом деле был «просторным» человеком. В любой самой разнородной компании он мгновенно становился ее душой, и всё начинало вертеться и крутиться вокруг него. Ему покорялись и им восхищались даже люди, еще вчера мало знакомые, далекие от его жизни и деятельности. А при этом заправляющий всеми «вождь» сам ходил в магазин за продуктами, зачастую был и за повара, и за тамаду. Хлебосолье Аркадия Евгеньевича и умение каждый вечер (любой конференции) превратить в праздник с песнями и танцами поражали. Несмотря на свои физические габариты, он был очень пластичным танцором... А как его любили женщины!



Аркадий Евгеньевич по жизни был отъявленным спорщиком. Причем, не оголтелым, а скорее лукавым. Спорить он мог по любому поводу. Так, закусывая квашеной капустой, он с усмешкой мог сказать: «Капуста неплохая, но сделана совершенно неправильно». И под рюмочку завязывается долгий спор, как надо квасить капусту или солить грибы. С ним интересно было ездить по командировкам или охотиться за грибами. Никогда и нигде не чувствовалась разница в возрасте и положении.

Аркадий Евгеньевич никогда не останавливался на достигнутом, он продолжал мечтать о новых стройках, о новых исследованиях, о том, что ждет институт в будущем. «Давайте помечтаем» – так назвал Аркадий Евгеньевич послесловие к книге «Горный институт УрО РАН: 20 лет научной и образовательной деятельности». Несколько цитат из этого эссе: «...думая о будущем, хочется, может быть, больше всего: сохранить на долгие годы творческий и дружеский дух, взаимопомощь и взаимопонимание, честность и принципиальность, порядочность и сопереживание, требовательность и справедливость, то есть те принципы, на которых все эти годы мы строили институт, которые мы непрерывно внедряли в сознание людей и которые позволили превратить трудовой коллектив в настоящую семью, где горе и радость – на всех одни.

Только в таком институте могут рождаться и воплощаться новые идеи, только в такой дом хочется ежедневно приходить и отдавать ему все, что ты можешь, только с таким коллективом можно не бояться потрясений и кризисов, взлетов и падений и с нескрываемым оптимизмом смотреть и идти в будущее!»

Сегодня институту 35 лет. В нем служат на благо российской горной науки более 300 человек. Благодаря устойчивости коллектива институт пережил «перестройку» Российской академии наук, структурно войдя в Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (рис. 11). Институт по праву входит в число ведущих институтов Российской академии наук. В нем сложилось оптимальное сочетание фундаментальных и прикладных исследований. Научные разработки института востребованы горной практикой. Среди наших промышленных партнеров – крупнейшие добывающие компании России и ближнего зарубежья: ПАО «Уралкалий», АО «Беларуськалий», ПАО «ГМК «Норильский никель», МХК «Еврохим», АК «Алроса», ПАО «Лукойл» и многие другие. Институт воплощает в жизнь идеи и мечты А.Е.Красноштейна: расширяется имущественный комплекс, лаборатории пополняются новым современным оборудованием, в коридорах и кабинетах все больше лиц молодых людей.



Рис. 11. Горный институт сегодня

Растет и приумножает свои исследования созданная в Горном институте Аркадием Евгеньевичем научная школа по рудничной аэрологии. Сегодня ее разработки известны и активно используются далеко за пределами нашей страны. Но, может быть, еще более важно, что школа, впрочем, как и весь институт, чтит традиции, заложенные Аркадием Евгеньевичем Красноштейном.

Многие люди благодарны судьбе, что на их жизненном пути встретился этот за-

мечательный, самобытный, неповторимый, умный и обаятельный человек, жизнь и деятельность которого наполнена достоинством и честью, любовью к близким, отечеству, верой в бессмертье добрых дел. Аркадий Евгеньевич в памяти многих – красавец, жизнелюб, человек-глыба, добрый, улыбающийся, ответственный, решительный...

Таким он остается в нашей памяти, в сердцах всех, кто знал и любил Аркадия Евгеньевича Красноштейна.



#### **Сведения об авторах**

*Барях Александр Абрамович*, доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Научный руководитель Горного института УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614907, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: bar@mi-perm.ru

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

*Материал поступил в редакцию 15.02.2023 г.*

## РОБЕРТ АЛЕКСЕЕВИЧ ПШЕНИЧНОВ, ВКЛАД В СТАНОВЛЕНИЕ АКАДЕМИЧЕСКОЙ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ НАУКИ В ПЕРМИ

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

А.Р. Чудинова, *МАОУ «Гимназия №33» г. Перми*

**Для цитирования:**

Ткаченко А.Г., Чудинова А.Р. Роберт Алексеевич Пшеничнов, вклад в становление академической микробиологической науки в Перми // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 93–99. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.10>



*Заслуженный деятель науки РФ, профессор, доктор медицинских наук, автор многочисленных научных трудов в области общей и инфекционной микробиологии, генетики, мутагенеза, экологии микроорганизмов.*

*Основатель академической микробиологической науки в Перми.*

*Роберт Алексеевич  
Пшеничнов  
(1933 – 2008 гг.)*

Основная научная и организационная деятельность Роберта Алексеевича Пшеничнова связана с открытием в 1971 г. Отдела селекции и генетики микроорганизмов Института экологии растений и животных Уральского отделения АН СССР и назначением его заведующим этого первого академического учреждения в г. Перми. Заслуга в подборе научных кадров и оснащении нового подразделения самым современным микробиологическим оборудованием того времени принадлежит Р.А. Пшеничнову. Развитие на его основе научно-экспериментальной базы легло в основу направлений исследований, сложившихся в Отделе и получивших свое развитие в процессе его преобразования в Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО АН СССР в 1988 г.

Многие из них нашли применение в решении прикладных задач. Использование возможностей непрерывного культивирования микроорганизмов легло в основу предложенного Робертом Алексеевичем метода рекультивации шахтных отвалов. Им также успешно развивалось направление, связанное с использованием и усовершенствованием методов индикации загрязнений окружающей среды. Под руководством Р.А. Пшеничнова на основе генно-инженерного штамма *Escherichia coli lum+* разработан новый вариант биоиндикатора токсикантов –

микробиоллюминесцентный индикатор токсичности – МИТ, который обладал более высокой чувствительностью к токсичным соединениям. Роберт Алексеевич является автором пяти монографий и шести выпусков каталогов мутагенов, а также других многочисленных научных трудов в области общей и инфекционной микробиологии, генетики, мутагенеза и экологии микроорганизмов.

Роберт Алексеевич Пшеничнов родился 8 апреля 1933 г. в г. Нижний Тагил Свердловской области в семье выдающегося микробиолога, основателя Пермской микробиологической школы, Алексея Васильевича Пшеничнова. Глубокие научные традиции, сформировавшиеся в семье, где родился Роберт Алексеевич, не могли не отразиться на всей его дальнейшей судьбе. И это было заложено уже тем, что, согласно семейным преданиям, имя свое он получил в честь выдающегося немецкого ученого-микробиолога Роберта Коха, глубоко почитаемого главой семейства Алексеем Васильевичем, который всю свою жизнь посвятил борьбе со смертельно опасной болезнью – сыпным тифом. Его неоценимой заслугой явилась разработка совместно с Борисом Иосифовичем Райхером в 1942 г. эффективной вакцины для профилактики этой инфекции, широкое применение которой позволило предотвратить эпидемию тифа во время Великой Отечественной войны в действующей армии и в тылу, за что в 1946 г. они были награждены Сталинской премией третьей степени.

Но не менее важным событием в жизни знаменитого отца Роберта Алексеевича, в особенности с точки зрения современного поколения пермских микробиологов, явилось то, что он был одним из инициаторов открытия в Перми Отдела селекции и генетики микроорганизмов ИЭРЖ УрО АН СССР, позднее Отдела, а ныне Института экологии и генетики микроорганизмов ПФИЦ УрО РАН. Именно с создания этого академического подразделения, которое возглавил Роберт Алексеевич Пшеничнов, берет свое начало становление Пермской академической микробиологической науки, в последствии заявившей о себе существенным вкладом не только в российскую, но и в мировую биологическую науку в области микробиологии, молекулярной биологии, генетики, систематики, иммунитета и ряда сопутствующих дисциплин. И уж, конечно, не родственные связи послужили причиной назначения Роберта Алексеевича на этот почетный пост. Об этом свидетельствует тот большой путь, который за сравнительно короткое время прошел к тому времени Роберт Алексеевич в своей научной карьере.

В 1957 г. он с отличием закончил Пермский государственный медицинский институт, накопив к этому времени уже большой опыт научной работы в студенческих научных кружках, включая микробиологический. Это позволило ему, работая в Пермском НИИ вакцин и сывороток, спустя всего полтора года после окончания медицинского института защитить кандидатскую диссертацию. Об этом периоде своей жизни Роберт Алексеевич писал в заметке, напечатанной в газете ПНИИВС и озаглавленной «Путь в науку»: «Я пришел в Институт вакцин и сывороток, минув аспирантуру. Хотелось максимально сократить время. Еще в студенческие годы начал приобретать навыки научной работы. И надо сказать, что в мединституте мне всячески облегчали эту задачу. Позволяли досрочно сдавать экзамены, предоставляли лаборатории. От научного студенческого общества посылали на теоретические конференции в Москву, Свердловск, Челябинск. Ничего не скажешь, возможности учиться были самые широкие. И то, что мне удалось защитить кандидатскую диссертацию, безусловно, не только моя личная заслуга».

Работая в НИИ вакцин и сывороток, Роберт Алексеевич продолжал свою научную деятельность, возглавив риккетсиозную лабораторию, и уже к 1967 году закончил работу над докторской диссертацией, которая завершилась успешной защитой. Это способствовало тому, что его незаурядные организаторские способности, большой опыт научной работы, накопленный к моменту организации Отдела селекции и

генетики микроорганизмов ИЭРЖ УрО АН СССР, несмотря на сравнительно молодой возраст, а также присущая ему энергия и стремление ко всему новому, решили в пользу Роберта Алексеевича назначение его на должность заведующего Отделом в 1971 г. Именно с этого момента берет свой отсчет начало становления академической микробиологической науки в Перми.

Это было нелегкое время, связанное с подбором научных кадров, поиском помещений для организации рабочих мест, приобретением оборудования, соответствующего решению научных задач высокого академического уровня и целым рядом других проблем. Первыми сотрудниками вновь образованного Отдела, кроме заведующего, Роберта Алексеевича Пшеничнова, были кандидаты медицинских наук Вадим Михайлович Колотов и Владимир Павлович Коробов, а также лаборант Алевтина Анатольевна Еремина. Первоначально в составе Отдела были сформированы всего две лаборатории: популяционной генетики во главе с Р.А. Пшеничновым и биохимии развития во главе с В.П. Коробовым. С 1972 г. при Отделе была открыта аспирантура, и первым аспирантом стал Ткаченко Александр Георгиевич, а в 1974 г. – Ившина Ирина Борисовна, которые выполняли свои диссертационные работы под руководством профессора Р.А. Пшеничнова. С тех пор кадровый состав неуклонно пополнялся, и в настоящее время в Институте экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН как правопреемнике одноименного Отдела работает 152 человека, из них сотрудников, занимающихся научными исследованиями и разработками – 64 человека, в том числе 2 академика РАН, 18 докторов и 43 кандидата наук.

Возвращаясь к истокам становления Отдела, следует сказать, что первыми из приобретенного основного научного оборудования стали приборы микробиологического назначения – аппараты непрерывного культивирования АНКУМ-2, которые сыграли существенную роль в формировании научных направлений Отдела и будущего института на многие годы вперед. Следует отметить, что эти аппараты – одно из достижений отечественного приборостроения того времени – были произведены в СКБ биологического приборостроения, г. Пущино под Москвой. Насыщенные электроникой, они обеспечивали возможность контролируемого управления ростовыми и метаболическими процессами, протекающими в бактериальных клетках, что давало возможность моделировать и изучать процессы адаптации микроорганизмов в ответ на внешние воздействия различной природы, вызывающие стресс. Те ранние исследования впоследствии способствовали развитию в ИЭГМ УрО РАН направления изучения молекулярных механизмов, лежащих в основе адаптации микроорганизмов к стрессу, имеющих много общего с аналогичными процессами, происходящими в клетках высших организмов, включая человека. Конечно, с обновлением и расширением приборной базы ИЭГМ УрО РАН эти исследования вышли на более высокий, мировой уровень, но следует помнить, что многие идеи, получившие свое развитие на современном этапе научного процесса в ИЭГМ, возникли на базе тех ранних экспериментов, осуществленных с помощью АНКУМов. И одна из них находит свое продолжение сегодня в виде разработки такого направления научно-исследовательской работы Института, как «Молекулярно-генетические механизмы адаптации микроорганизмов к стрессорным факторам. Регуляция роста и развития микроорганизмов в экспериментальных условиях и природных экосистемах».

Преимущества непрерывного культивирования микроорганизмов перед традиционными способами способствовали разработке Робертом Алексеевичем метода рекультивации шахтных отвалов, который был успешно применен в совместной работе с Пермским научно-исследовательским институтом Министерства



угольной промышленности СССР. В основу метода была положена идея обогащения почв, загрязненных сточными водами шахтных отвалов, активными культурами азотфиксирующих микроорганизмов. Насыщение почвы азотом, фиксируемым из воздуха за счет присутствия этим микроорганизмам специфической метаболической активности, способствовало восстановлению природного микробиоценоза почв и возвращению их в сферу природопользования.

Понимание существенной роли микроорганизмов в формировании не только почвенных и водных биоценозов, но и биосферы в целом привело Р.А. Пшеничнова к необходимости развития научного направления, связанного с изучением биогеоценозов и роли микроорганизмов в масштабе геологических биосферных процессов. Это способствовало организации в 1975 г. лаборатории геологической микробиологии, третьей лаборатории в структуре Отдела экологии и генетики микроорганизмов, которую возглавил кандидат геолого-минералогических наук Александр Антонович Оборин, защитивший в 1991 г. докторскую диссертацию по результатам разработки данного направления. Дальнейшее развитие этих исследований привело к появлению многочисленных публикаций и защитах кандидатских и докторских диссертаций. Во многом под влиянием этих исследований сформировалось одно из основных научных направлений ИЭГМ ПФИЦ УрО РАН: «Структура и функция микробных сообществ. Оценка роли микроорганизмов в биосферных процессах. Формирование коллекции штаммов природных микроорганизмов», которое разрабатывается под руководством заведующей лабораторией алканотрофных микроорганизмов академиком РАН Ириной Борисовной Ившиной.

Возглавляя лабораторию популяционной генетики, Р.А. Пшеничнов развивал исследования, связанные с использованием и усовершенствованием методов индикации загрязнений окружающей среды отходами производства, содержащими соединения, которые при попадании в организм человека могли вызывать мутагенный эффект, приводящий к изменению его наследственного аппарата, что повышало риск развития злокачественных новообразований. Заслугой Роберта Алексеевича является то, что среди огромной информации по данному вопросу он сумел усмотреть и взять на вооружение новые и наиболее перспективные в то время методы выявления мутагенных соединений. Эти методы, использующие в качестве индикаторов бактериальные тест-системы, претерпев некоторые усовершенствования, сохраняют актуальность по настоящее время. Бактериальная основа используемых тест-систем характеризуется рядом преимуществ, обуславливающих их широкое использование: высокой скоростью размножения бактерий, дающей возможность обнаружения и регистрации редких мутаций, даже происходящих с такой низкой частотой, как  $10^{-6}$ ; хорошей изученностью генома бактерий и дешевизной методов культивирования, а также минимальным временем, необходимым для проведения анализа.

Наряду с этим, внимание Р.А. Пшеничнова привлек метод тестирования разнообразных загрязнений среды, основанный на биолюминесценции и применяемый для проведения первичного интегрального анализа объектов окружающей среды. Его преимуществами являются простота, быстрота выполнения, относительно низкая стоимость и возможность проведения исследований в полевых условиях. Люминесцентный метод ингибирования свечения фотобактерий является важным инструментом для оценки токсичности различных химических веществ, при котором измеряется снижение светового потока в связи с взаимодействием бактерий и токсичных соединений.

В процессе использования данного метода коллективом лаборатории экологической генетики микроорганизмов под руководством Р.А. Пшеничнова проведена его оптимизация, что повысило потенциал возможностей данного теста. На

основе генно-инженерного штамма *E.coli lum+* ими разработан новый вариант биоиндикатора токсикантов – Микробиоллюминесцентный Индикатор Токсичности – МИТ, который обладал более высокими уровнями свечения и чувствительности к токсикантам. МИТ давал возможность количественно оценивать токсичность отдельных веществ, их смесей в воде, почве и промышленных стоках при различных типах и режимах очистки, а также определять класс токсичности сырья, продукции и отходов промышленности.

Итогом развития данного направления исследований явилась публикация ряда монографий, посвященных изложению экспериментальных подходов по усовершенствованию биоллюминесцентных сенсоров и, что наиболее важно, шести выпусков каталогов мутагенов, где приведено описание десятков соединений, обладающих мутагенным эффектом, которые стали документальным подтверждением их биологической опасности с вытекающими отсюда рекомендациями по ее предотвращению.

Характеризуя научную деятельность Роберта Алексеевича Пшеничнова в целом, следует сказать, что ему принадлежат многочисленные научные труды в области общей и инфекционной микробиологии, генетики, мутагенеза, экологии микроорганизмов. Результаты его исследований опубликованы в 164 печатных работах, в том числе пяти монографиях, шести каталогах мутагенов, шести авторских свидетельствах и патентах. Р.А. Пшеничнов является автором трех диагностических препаратов, выпускаемых НПО «Биомед», г. Пермь.

Свою научную работу Роберт Алексеевич совмещал с педагогической и общественной деятельностью: два года заведовал кафедрой микробиологии Пермского медицинского института и три года был профессором Пермского фармацевтического института. В течение нескольких лет он был председателем Государственной экзаменационной комиссии биологического факультета Пермского государственного университета, осуществлял руководство аспирантами, подготовил более 20 кандидатов наук. В течение 15 лет возглавлял Пермское отделение Всероссийского общества микробиологов.

Его трудовая деятельность отмечена присвоением ему звания заслуженного деятеля науки Российской Федерации, медали Пастера, медали «100 лет рождения В.И. Ленина», 3 медалей ВДНХ, знаком «Отличник здравоохранения».

Рассказывая о Роберте Алексеевиче Пшеничнове как учёном, нельзя не сказать о том, каким он был человеком. О своём отце вспоминает Алла Робертовна Чудинова (Пшеничнова), кандидат педагогических наук, педагог-исследователь:

«Отцу я безмерно благодарна за те жизненные уроки, которые от него получила. Первое, что я почувствовала, поняла, – это абсолютная ценность семьи и семейных отношений. Мои родители бережно хранили и поддерживали связи со всеми, даже самыми дальними родственниками: переписывались, созванивались, ездили в гости и сами с удовольствием принимали у себя гостей отовсюду: из Ульяновка, Москвы, Загорска, Казани, Свердловска, Обнинска... Каждая семейная встреча – это долгие душевные разговоры, воспоминания о старшем, уже ушедшем, поколении, выезды на дачу, песни вечером у костра или за столом и обязательный ритуал этих встреч – просмотр семейного архива, к созданию которого папа подходил очень творчески, с особой трогательной тщательностью. Основой архива стали большие альбомы, куда бережно вклеивались не только фотографии, но и газетные статьи, рассказывающие о больших и малых достижениях и победах представителей семьи Пшеничновых, грамоты, дипломы, свидетельства, поздравительные телеграммы, фрагменты писем, рисунки... Все материалы сопровождалась весёлыми, иногда ироничными подписями.

В молодости вместе со своим отцом, Алексеем Васильевичем Пшеничным, папа побывал в туристических поездках в Европе, странах Востока. Многие фотографировал, но напечатать качественные цветные фотографии в 60–70-е гг. в Советском Союзе было практически невозможно. Тогда папа купил диапроектор и из лучших кадров сделал слайды. Так, просмотр слайдов в сопровождении интереснейших папиных рассказов о зарубежных поездках стал ещё одной семейной традицией. Со временем папа увлёкся видеосъёмкой – архив пополнился семейной хроникой, без звука, правда, но с субтитрами, выложенными на магнитной доске, специально приобретенной для нужд фото- и киноиндустрии семьи Пшеничных.

Навсегда осталось в памяти уважительное, граничащее с преклонением отношение отца к своим родителям, стремление сохранить заложенные ими семейные традиции и ценности, радость и гордость за детей и внуков, за их профессиональные и личностные достижения.

Второй жизненный урок – это урок преданности своему делу. Наука была для отца не просто работой, а смыслом жизни. Наверное, поэтому удалось так много сделать, многого достичь. В его жизни никогда не было строгого деления: с 9:00 до 17:00 – работа, с 17:00 до 9:00 – свободное от работы время. Если из его кабинета вырывались клубы сигаретного дыма и всю ночь слышался стук печатной машинки, значит, какая-то внезапно пришедшая в голову научная идея обретала воплощение на бумаге. И время суток было ни при чём!

Именно от отца я усвоила, казалось бы, очевидную, но не всеми принимаемую истину: нужно жить своим делом, не пытаясь извлечь из него сиюминутную выгоду. Стремление получить материальное вознаграждение, признание, другие социальные «бонусы» как главная и единственная мотивация трудовой, а тем более научной, творческой деятельности, никогда не приведёт к желаемому результату и сам процесс сделает безынтересным и утомительным.

Папа прекрасно понимал, как важно человеку найти своё дело, которое придаст его жизни профессиональный и личностный смысл. Возможно, поэтому, пусть не без внутреннего сопротивления, они с мамой приняли моё решение нарушить традиции медицинской династии Пшеничных и поступить на филологический факультет Пермского государственного университета. Только спустя много лет начала понимать, чего стоило родителям удержаться от использования авторитетных (и даже авторитарных!) рычагов воздействия, признать за мной право выбора своего жизненного пути. Благодаря их родительской мудрости, я всю жизнь занимаюсь любимым делом.

Многое зависит от того, какие люди тебя окружают. Вот ещё один очень важный жизненный урок, который я получила от папы. Около него никогда не было людей случайных, только самые близкие – те, с кем судьба свела родителей на разных этапах жизни, и кто навсегда остался рядом. При этом социальный статус человека не имел для отца никакого значения. За одним столом в нашем гостеприимном доме соседствовали представители рабочих профессий и ученые с мировым именем, ведущие артисты Пермского театра оперы и балета и люди с тремя классами образования. Главным были открытость, искренность, увлечённость, душевная чуткость, способность разделить с другом горе и радость, готовность прийти на помощь в трудную минуту. И хотя папы нет уже 15 лет, я до сих пор ощущаю внимание и заботу его друзей.

Мне посчастливилось родиться в семье человека, увлечённого своим делом, неординарного и творческого. Это большое счастье, но одновременно и большая ответственность. На могильной плите моего дедушки написаны слова Д.И. Менделеева: «Посев научный взойдёт для жатвы народной». Думаю, эти слова

можно отнести и к его сыну, моему отцу Роберту Алексеевичу Пшеничнову. Папа прожил интересную, насыщенную жизнь, занимался делом, которое по-настоящему любил и которое продолжено его коллегами и единомышленниками. В 2023 году ему исполнилось бы 90 лет. Спасибо всем, кто сегодня помнит Роберта Алексеевича как человека, гражданина и ученого, посвятившего свою жизнь науке».

Роберт Алексеевич Пшеничнов ушел из жизни 17 января 2008 года в возрасте 75 лет, навсегда оставив память о себе как российском ученом, внесшим большой вклад в становление Пермской академической микробиологической науки.

*В работе использованы материалы из домашнего архива семьи Р.А. Пшеничнова*

**Сведения об авторах**

*Ткаченко Александр Георгиевич*, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией адаптации микроорганизмов, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИЭГМ УрО РАН»), 614081, г. Пермь, ул. Голева, 13; e-mail: agtkachenko@iegm.ru

*Чудинова Алла Робертовна*, кандидат педагогических наук, учитель высшей категории, статус «педагог-исследователь», Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение «Гимназия №33» г. Перми (МАОУ «Гимназия №33» г. Перми), 614007, г. Пермь, ул. Николая Островского, 68; e-mail: tchudinova.alla@yandex.ru

*Материал поступил в редакцию 27.01.2023 г.*