



ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

Научный журнал

ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ 3/2026

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

Главный редактор

акад. РАН *В.П. Матвеев*

Зам. главного редактора

акад. РАН *А.А. Барях*

чл.-кор. РАН *О.А. Плехов*

Редакционная коллегия

чл.-кор. РАН *А.К. Беляев, Санкт-Петербург*

д.т.н. *В.А. Вальцифер, Пермь*

д.м.н. *С.В. Гейн, Пермь*

акад. РАН *А.В. Головнев, Санкт-Петербург*

д.ф.-м.н. *Е.В. Ерманюк, Новосибирск*

д.б.н. *Е.Н. Ефременко, Москва*

д.б.н. *Н.Е. Завьялова, Пермь*

чл.-кор. РАН *Н.Н. Зезин, Екатеринбург*

д.и.н. *В.А. Иванов, Уфа*

акад. РАН *И.Б. Ившина, Пермь*

д.б.н., акад. АН РТ *О.Н. Ильинская, Казань*

к.с.-х.н. *К.Н. Корляков, Пермь*

д.и.н. *Н.Б. Крыласова, Пермь*

д.м.н. *М.В. Кузнецова, Пермь*

акад. РАН *А.В. Кучин, Сыктывкар*

чл.-кор. РАН *Л.Ю. Левин, Пермь*

д.ф.-м.н. *А.И. Мизёв, Пермь*

акад. РАН *В.О. Михайлов, Москва*

д.ф.-м.н. *И.А. Пантелеев, Пермь*

акад. РАН *И.Ю. Рассказов, Хабаровск*

д.т.н. *И.А. Санфилов, Пермь*

чл.-кор. РАН *С.В. Смирнов, Екатеринбург*

д.ф.-м.н. *Р.А. Степанов, Пермь*

чл.-кор. РАН *В.Н. Стрельников, Пермь*

д.г.-м.н. *И.И. Чайковский, Пермь*

акад. РАН *В.Н. Чарушин, Екатеринбург*

акад. РАН *В.А. Черешнев, Екатеринбург*

чл.-кор. РАН *А.В. Черных, Пермь*

д.х.н. *Ю.В. Шкляев, Пермь*

Ответственный секретарь

к.ф.-м.н. *А.Г. Вотинова*

Адрес редакции журнала:

614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13А

тел.: (342) 212-40-64

e-mail: vestnik@permisc.ru

<https://journal.permisc.ru/index.php/pscj>



PERM FEDERAL RESEARCH CENTER JOURNAL

Scientific journal

JULY – SEPTEMBER 3/2026

Published since 2008

Issued quarterly

ISSN 2658-705X

Editor-in-Chief

RAS acad. *V.P. Matveenko*

Deputy editor-in-chief

RAS acad. *A.A. Baryakh*

RAS corresp. member *O.A. Plekhov*

Editorial Board

RAS corresp. member *A.K. Belyaev, St. Petersburg*

Dr. Sci. (Tech.) *V.A. Valtsifer, Perm*

Dr. Sci. (Med.) *S.V. Gein, Perm*

RAS acad. *A.V. Golovnev, St. Petersburg*

Dr. Sci. (Phys.-Math.) *E.V. Ermanyuk, Novosibirsk*

Dr. Sci. (Biol.) *E.N. Efremenko, Moscow*

Dr. Sci. (Biol.) *N.E. Zavyalova, Perm*

RAS corresp. member *N.N. Zezin, Ekaterinburg*

Dr. Sci. (Hist.) *V.A. Ivanov, Ufa*

RAS acad. *I.B. Ivshina, Perm*

Dr. Sci. (Biol.) acad. of TAS *O.N. Ilinskaya, Kazan*

Cand. Sci. (Agric.) *K.N. Korlyakov, Perm*

Dr. Sci. (Hist.) *N.B. Krylasova, Perm*

Dr. Sci. (Med.) *M.V. Kuznecova, Perm*

RAS acad. *A.V. Kuchin, Syktyvkar*

RAS corresp. member *L.Y. Levin, Perm*

Dr. Sci. (Phys.-Math.) *A.I. Mizev, Perm*

RAS acad. *O.V. Mikhailov, Moscow*

Dr. Sci. (Phys.-Math.) *I.A. Panteleev, Perm*

RAS acad. *I.Yu. Rasskazov, Хабаровск*

Dr. Sci. (Tech.) *I.A. Sanfirov, Perm*

RAS corresp. member *S.V. Smirnov, Ekaterinburg*

Dr. Sci. (Phys.-Math.) *R.A. Stepanov, Perm*

RAS corresp. member *V.N. Strelnikov, Perm*

Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) *I.I. Chaikovsky, Perm*

RAS acad. *V.N. Charushin, Ekaterinburg*

RAS acad. *V.A. Chereshev, Ekaterinburg*

RAS corresp. member *A.V. Chernykh, Perm*

Dr. Sci. (Chem.) *Y.V. Shklyayev, Perm*

Executive Editor

Cand. Sci. (Phys.-Math.) *A.G. Votinova*

Editorial office address:

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

tel.: (342) 212-40-64

e-mail: vestnik@perm-sc.ru

<https://journal.perm-sc.ru/index.php/pscj>

СОДЕРЖАНИЕ

ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ 3/2026

МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Матвеев В.П., Сероваев Г.С.

- Измерение деформаций волоконно-оптическими датчиками. Обзор 5
- Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В.*
- Гидродинамические аспекты инженерных решений устойчивого
технического водопользования в условиях значительной
стратификации водных масс 33

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Дьяконов М.В., Ляхин Ю.С., Лучников А.И.

- Влияние гидрологических факторов на разработку Тюбегатанского
месторождения калийных солей (Республика Узбекистан) 49
- Егорова А.Б., Санфиров И.А., Тезиков А.Д.*
- Режимные геофизические исследования в инженерно-геологических
скважинах: выделение зон разуплотнения, проницаемости
и вторичной глинистости 60

МИКОБИОЛОГИЯ, ИММУНОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ

Ефременко Е.Н., Степанов Н.А.

- Дрожжи в микробных консорциумах, осуществляющих
биodeградацию органических эkoпoлнoтaнтoв. 72
- Пoлyдoвa Т.В., Aнтипьeвa М.В.*
- Aдгeзия бaктepий c paзнoм ypoвнeм гидpoфoбнocти к пoвepxнocти
синтeтичecкиx пoлимepoв 93

ХИМИЯ И НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ

Горбунова М.Н.

- Биоцидные гуанидиниевые и фосфониевые полимерные материалы. . . 102

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

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

- Левзея сафлоровидная как источник кормовой фитодобавки
для молодняка сельскохозяйственной птицы. 118

ОБЩЕСТВО И ЧЕЛОВЕК

Лобанова А.С., Кривошеков А.Д.

- Лексемы колодец, юкмös и öшмös «колодец» в коми-пермяцком языке:
этимология и семантика. 127
- Кочеров А.А.*
- Пермское этнографическое общество в 1920-30-е гг 137
-

CONTENTS

JULY – SEPTEMBER 3/2026

CONTINUUM MECHANICS

Matveenkov V.P., Serovaev G.S.

Strain measurement using fiber-optic sensors: a review5

Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N., Bogomolov A.V.

Computational hydrodynamic aspects of engineering solutions
ensuring the determination of technical water use under conditions
of stable stratification33

GEOSCIENCES

Dyakonov M.V., Lyakhin Yu.S., Luchnikov A.I.

Influence of hydrological factors on the development
of the Tyubegatan potassium salt deposit (Republic of Uzbekistan) 49

Egorova A.B., Sanfirov I.A., Tezikov A.V.

Monitoring geophysical surveys in engineering-geological
boreholes: identification of disintegration zones, permeability,
and secondary clay alteration 60

MICROBIOLOGY, IMMUNOLOGY, ECOLOGY

Efremenko E.N., Stepanov N.A.

Yeast in microbial consortia mediating the biodegradation
of organic ecopollutants 72

Polyudova T.V., Antipeva M.V.

Adhesion of bacteria with different levels of hydrophobicity
to the surface of synthetic polymers 93

CHEMISTRY AND MATERIAL SCIENCES

Gorbunova M.N.

Biocidal guanidinium and phosphonium polymeric materials 102

AGRICULTURAL SCIENCES

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

Rhaponticum carthamoides as a source feed phytodrugs for young poultry. . . 118

HUMAN AND SOCIETY

Lobanova A.S., Krivoshchekov A.D.

The lexemes kolodets, yukmös and öshmös
in the komi-permyak language: etymology and semantics 127

Kocherov A.A.

Perm ethnographic society in the 1920s–1930s 137

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ. ОБЗОР

Матвеев В.П., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Сероваев Г.С., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Работа посвящена обзору исследований, связанных с измерением деформаций волоконно-оптическими датчиками (ВОД). Рассмотрены точечные ВОД на основе брэгговской решетки и распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния. Приводится краткая история появления ВОД и краткая информация о принципах работы точечных и распределенных датчиков. Приведены варианты применения ВОД в авиационных конструкциях, геотехническом мониторинге, строительной инфраструктуре, медицине и биомеханике. Основное внимание уделено факторам, определяющим достоверность значений деформаций, измеряемых точечными и распределенными ВОД: передаче деформаций от объекта измерений к зоне оптического волокна, обеспечивающей измерения; изменению структуры и напряженно-деформированного состояния в материале после встраивания в него ВОД; учету сложно-напряженного состояния в оптическом волокне при вычислении деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиком; влиянию температуры и влажности; влиянию градиента деформаций. Проанализировано направление, связанное с измерением встроенными в материал ВОД технологических и остаточных деформаций в полимерных и композиционных материалах, изготовленных различными технологиями химического формования и аддитивными технологиями. Показано, что корректная интерпретация показаний датчиков требует учета физических принципов измерения, условий закрепления или встраивания, свойств материала и алгоритмов обработки данных. Рассмотрены перспективные направления применения ВОД.

Ключевые слова: измерение деформаций, волоконно-оптические датчики, волоконная брэгговская решетка, оптическая рефлектометрия в частотной области, точечные датчики, распределенные датчики, полимерный композитный материал

История появления волоконно-оптических датчиков деформаций

Измерение деформаций является одной из ключевых задач при мониторинге механического состояния машин, конструкций и сооружений. Для решения этой задачи применяются механические, гидравлические, оптические, тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики, контактные и бесконтактные экстензометры. Развитие волоконной оптики в 1980-х годах привело к появлению нового класса чувствительных элементов — волоконно-оптических датчиков (ВОД), в том числе ВОД деформаций. История волоконной оптики тесно связана с разработкой и появлением лазеров в начале 1960-х годов [1]. В исследовании [2] были сформулированы основные концепции работы оптических волокон и теоретически продемонстрировано их потенциальное преимущество при передаче информации по сравнению с медным кабелем. Главная проблема на пути к широкому использованию оптического волокна была связана с высоким уровнем затухания в стеклянных волноводах. К 1970 году было получено кварцевое оптическое волокно с низким уровнем затухания и пропускной способностью, превышающей медный провод в 65000 раз [3]. Далее происходил

экспоненциальный рост количества научных исследований в области фотоники и волоконной оптики. Начали появляться работы, посвященные использованию оптических волокон не только в качестве эффективного канала передачи информации, но и в качестве чувствительного элемента, позволяющего регистрировать различные параметры [4].

Волоконно-оптические датчики можно разделить на две основные группы по протяженности измерительного участка: точечные и распределенные. Появлению точечных ВОД способствовало открытие в 1978 году явления фоточувствительности кварцевых оптических волокон, легированных германием, которое заключается в изменении показателя преломления сердцевинны оптического волокна при интенсивном воздействии ультрафиолетового излучения (УФ) на некоторую область оптического волокна [5]. Данное открытие является ключевым в истории появления структуры в сердцевине оптического волокна, получившей название волоконной брэгговской решетки (ВБР) и являющейся основой наиболее распространенного типа ВОД. Впоследствии был предложен более совершенный способ записи ВБР через боковую поверхность оптического волокна с помощью двух пересекающихся пучков УФ-излучения [6].

Классификация волоконно-оптических датчиков

ВБР представляет собой периодическое изменение показателя преломления на определенной области сердцевинны оптического волокна. Такая решетка работает как узкополосный отражающий оптический фильтр. Источник света запускает по волоконному световоду широкополосный оптический сигнал. Большая часть света проходит через решетку без отражения, и лишь в определенном узком диапазоне длин волн свет отражается от решетки. Резонансная (брэгговская) длина волны λ_B отраженного сигнала пропорциональна эффективному показателю преломления сердцевинны оптического волокна в области решетки n и геометрической длине периода решетки Λ [7,8]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

Общий вид зависимости сдвига резонансной длины волны от компонент тензора деформаций для двух независимых направлений поляризации в плоскости, перпендикулярной продольной оси оптического волокна, можно записать в виде [8]:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n_1^2(p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)),$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n_2^2(p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)),$$

где ε_3 – главная деформация вдоль оптического волокна; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации в плоскости, перпендикулярной оптическому волокну; $\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - \lambda_B$, $\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_B$ – разница величин резонансных длин волн отраженного спектра в текущий λ_1, λ_2 и отсчетный λ_B моменты времени; p_{11}, p_{12} – коэффициенты фотоупругости.

Для двулучепреломляющего оптического волокна $n_1 \neq n_2$. В оптически изотропном материале $n_1 = n_2 = n$. Для кварцевых и германо-силикатных оптических волокон в литературе приводятся различные экспериментально определенные значения показателя преломления и фотоупругих коэффициентов. В качестве типичных значений используются $n \approx 1.45 - 1.46$, $p_{11} \approx 0.113 - 0.125$, $p_{12} \approx 0.252 - 0.258$ [9–11].

Наиболее распространен вариант соотношений для одноосного напряженного состояния, при котором $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_3$, где ν – коэффициент Пуассона оптического волокна. В этом случае $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda$, и вместо двух уравнений с тремя неизвестными получается одно уравнение с одной неизвестной ε_3 :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\right)\varepsilon_3 \quad \text{или} \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{k} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B}$$

Для кварцевых оптических волокон при использовании типичных значений оптических и фотоупругих параметров $k \approx 0.78$.

При измерении деформаций необходимо учитывать влияние температуры. В случае одноосного деформирования волокна относительное изменение резонансной длины волны может быть записано в виде [12]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T + \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\right)\varepsilon_3,$$

где $\Delta T = T_1 - T_0$; T_1, T_0 – температура в окрестности датчика в текущий и отсчетный моменты времени; $\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР); $\beta = (1-n)(\partial n/\partial T)$ – термооптический коэффициент.

В отличие от точечных ВОД, в распределенном ВОД в качестве чувствительного элемента используется вся длина оптического волокна. В основе распределенных ВОД лежит измерение оптического рассеяния, возникающего в результате взаимодействия света с материалом в световоде оптического волокна. Выделяют три основных вида рассеяния, используемых в распределенных ВОД: рэлеевское (упругое), бриллюэновское и рамановское (комбинированное) рассеяния [13].

Среди распределенных ВОД наилучшим пространственным разрешением обладает метод, основанный на измерении спектрального сдвига в обратном рэлеевском рассеянии методом оптической рефлектометрии в частотной области (Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR) с использованием поляризационных измерений, который позволяет проводить распределенные измерения деформаций и температуры при помощи стандартного одномодового оптического волокна [14].

В основе OFDR лежит интерферометрическая схема с лазерным источником, перестраиваемым по длине волны. Одно плечо интерферометра является опорным, а второе содержит тестируемое оптическое волокно. Интерференционный сигнал, возникающий при смешении излучения из опорного и измерительного плеч, анализируется с использованием преобразования Фурье. Это позволяет получить рефлектограмму, представляющую собой распределение уровня отраженного сигнала в зависимости от расстояния вдоль тестируемого оптического волокна [15]. Измерительные системы на основе OFDR характеризуются высоким пространственным разрешением, но уступают распределенным методам на основе бриллюэновского и рамановского рассеяния по максимальной длине измерительной линии.

Принцип измерения деформаций на основе метода OFDR основан на том, что показатель преломления оптического волокна вдоль его длины претерпевает незначительные изменения вследствие наличия неоднородностей структуры материала. Распределение рассеяния, являясь уникальным для каждого тестируемого оптоволокна, остается постоянным от измерения к измерению при условии отсутствия внешнего воздействия. Для проведения измерений деформаций или температуры

с помощью рефлектометра обратного рассеяния на рефлектограмме тестируемого оптического волокна выбирается анализируемый участок волокна. Этот участок разбивается на подобласти заданной длины (база датчика, Δx) с определенным шагом (расстояние между датчиками), которые можно рассматривать как отдельные датчики. При этом подобласти могут пересекаться, а центр каждой подобласти является одной из точек на диаграмме распределенного измерения деформаций или температуры.

При внешнем воздействии на оптическое волокно (изменение деформации и/или температуры) происходит сдвиг спектра обратного рассеяния в частотной области относительно эталонного состояния. Для определения деформации или температуры в каждом анализируемом окне Δx рассчитывают величину спектрального сдвига относительно эталонной рефлектограммы, после чего этот сдвиг пересчитывают в искомую величину с использованием соответствующих коэффициентов деформационной и температурной чувствительностей оптического волокна.

Определяемый в окне анализа спектральный сдвиг обратного рэлеевского рассеяния Δv аналогичен сдвигу резонансной длины волны ВБР $\Delta \lambda$ и связан с изменением осевой деформации и температуры оптического волокна следующим образом:

$$\Delta \lambda / \lambda = -\Delta v / v = K_\varepsilon \varepsilon_3 + K_T \Delta T,$$

где K_T и K_ε – температурный и деформационный коэффициенты. Для большинства оптических волокон с германо-силикатной сердцевиной $K_T = 6.45 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$, $K_\varepsilon = 0.78$.

При постоянной деформации измеряемого участка оптического волокна изменение температуры может быть выражено:

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{c K_T} \Delta v,$$

где $\bar{\lambda}$ – центральная длина волны сканирования, c – скорость света.

Изменение деформации с учетом температурной компенсации можно выразить:

$$\varepsilon_3 = \frac{\bar{\lambda}}{c K_\varepsilon} (\Delta v^T - \Delta v),$$

где Δv^T – спектральный сдвиг, измеренный на участке оптического волокна, не испытывающем изменения деформации и находящемся в таком же температурном поле, как и компенсируемый участок.

Различные способы одновременного измерения деформаций и температуры с помощью волоконно-оптических датчиков рассмотрены в работе [16].

Несмотря на очевидные преимущества распределенных систем измерения деформаций методом OFDR на основе рэлеевского рассеяния, данные системы значительно уступают традиционным интеррогаторам ВБР датчиков в скорости опроса датчиков (сотни Гц против нескольких кГц) [17].

Для любого типа чувствительных элементов, в том числе ВОД, важной задачей является обеспечение точности измерений и валидации результатов. В работе [18] на примере испытаний на усталость и рост трещины показано, что измерения деформаций, выполняемые распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, хорошо согласуются с показаниями точечных ВБР датчиков и традиционных тензорезистивных датчиков в областях с умеренным градиентом деформаций. Измерение деформаций в областях с высоким градиентом деформаций с помощью распределенных ВОД

осложнено и может приводить к потере информации в силу сложности кросскорреляционного анализа [19]. Для повышения достоверности измерений в работе [20] предложен подход к калибровке показаний распределенных ВОД по данным конечного числа точечных ВБР датчиков.

Отдельной задачей является корректное сравнение точечных и распределенных ВОД. Как правило, такие измерения выполняются на разных оптических волокнах, расположенных вблизи друг от друга. Более достоверным является сравнение двух измерительных систем на одном оптическом волокне. В работе [21] рассмотрена задача измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния при наличии в измерительном оптическом волокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью. Показано, что при сканировании оптического волокна рефлектометром обратного рассеяния в диапазоне длин волн, включающем резонансные длины волн ВБР, возникает высокий уровень шума, а стандартные алгоритмы обработки данных не позволяют надежно выделить полезный сигнал. Сканирование вне резонансных длин волн ВБР устраняет этот шум, однако приводит к появлению нечувствительных зон в окрестности решеток. Для восстановления значений деформации в этих зонах предложен алгоритм, основанный на оконном преобразовании Фурье с оконной функцией Ханна. Работоспособность алгоритма продемонстрирована при измерении однородных и градиентных полей деформаций. В работе [22] исследуется точность измерения деформаций точечными ВОД на основе ВБР и распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния при помощи калибровочных экспериментов на балке равного сопротивления. Результаты исследования демонстрируют высокий уровень соответствия показаний всех чувствительных элементов и отличаются в пределах 5% от результатов численного моделирования методом конечных элементов.

Области применения волоконно-оптических датчиков

ВОД имеют ряд преимуществ по сравнению со многими традиционными средствами измерения: они устойчивы к электромагнитным помехам, могут работать в широком диапазоне температур, имеются возможности по размещению множества ВОД на одной линии оптического волокна и одновременной регистрации показаний со всех датчиков на линии [13, 23]. Малые размеры оптического волокна позволяют фиксировать ВОД как на поверхности конструкции, так и внедрять их в структуру материала, что открывает возможности для регистрации механического состояния не только в процессе эксплуатации, но и на этапе изготовления [24–27]. Благодаря этим особенностям ВОД находят применение в различных отраслях промышленности и техники, включая аэрокосмическую [28, 29], геотехническую [30–32], строительную [33–37] области, а также другие направления [38].

ВОД обеспечивают решение различных задач в авиационных конструкциях: выполняют роль чувствительного элемента в системе защиты летательных аппаратов от обледенения [39]; одиночные ВБР и розетки на их основе используются для мониторинга механического состояния шасси [40, 41]; ВОД применяются для контроля прогибов лонжерона крыла самолета [42], мониторинга его формоизменения и оценки действующих нагрузок [43–45], измерения деформаций при динамических испытаниях крыла в аэродинамической трубе [46]. В работах [47] и [48] продемонстрировано применение ВОД для регистрации деформированного состояния крыла в условиях

полета на беспилотном летательном аппарате и на среднемагистральном пассажирском самолете. Перспективы применения ВОД в изделиях из композитных материалов продемонстрированы в работе [49] при измерении деформаций датчиками, встроенными в композитный материал, из которого изготовлены элементы вертолета.

Перспективы ВОД связаны с их применением в смарт-материалах [50]. В качестве примеров можно привести их использование в системах активной волновой диагностики изделий из композиционных материалов [51–58], а также для измерения деформированной формы конструктивных элементов самолета [59, 60].

Геотехнический мониторинг является одной из естественных областей применения волоконно-оптических датчиков, поскольку многие контролируемые процессы развиваются не локально, а в пределах протяженных зон: в грунтовых массивах, склонах, сваях, анкерах, тоннелях, подземных выработках и областях осадок. Для подземных и водонасыщенных сред существенное значение также имеют долговечность измерительной системы, герметичность, устойчивость к электромагнитным воздействиям и возможность удаленного опроса [31, 61]. ВБР датчики в геотехнических задачах применяются главным образом как точечные или квазираспределенные чувствительные элементы, встроенные в специализированные преобразователи либо закрепленные на конструктивных элементах. В обзоре применений ВБР датчиков в геотехнических сооружениях [62] в качестве основных направлений выделены мониторинг состояния грунта и склонов. Практическая значимость использования ВОД показана в работах [63, 64], где на основе ВБР реализованы датчики наклона, линейного перемещения, порового давления и давления грунта для автоматизированного контроля устойчивости склонов и процессов просадки.

Анализ работ показал, что в геотехническом мониторинге наиболее востребованы распределенные ВОД. Показательной является работа [65], где приводятся результаты физического эксперимента по раннему обнаружению оползня, инициированного дождевыми осадками, в котором волокно было уложено вблизи ожидаемой поверхности скольжения, а регистрация деформаций позволила проследить эволюцию деформаций с сантиметровым пространственным разрешением вплоть до момента разрушения. Применение ВОД для контроля оползней показало значительную эффективность в качестве инструмента раннего оповещения и прогнозирования, но при этом отмечается сложность установки оптоволоконных кабелей в грунтовый массив склона. Необходимо отметить востребованность различных типов распределенных ВОД, в частности на основе бриллюэновского рассеяния, которые чаще используются на объектах большой протяженности [66, 67].

Современные исследования расширяют область применения ВОД в геотехнике. В исследованиях, посвященных мониторингу карстовых провалов, ВОД, встроенные в грунт, позволили регистрировать развитие провала и связанных с ним зон сдвига, а измеренные деформации использовались совместно с методом PIV и искусственной нейронной сетью для оценки осадки поверхности [68]. Обзор применения ВОД для мониторинга природных геологических угроз [69] подтверждает, что такие системы эффективно используются для раннего предупреждения при оползнях, просадках, землетрясениях и вулканической активности.

В области гражданского строительства применение ВОД направлено на мониторинг механического состояния мостов, тоннелей, зданий, трубопроводов,

автомобильных дорог, железнодорожных путей и других инфраструктурных объектов. В таких системах особенно востребован длительный контроль деформаций, температуры, трещинообразования, прогибов, перераспределения усилий и локальных зон деградации материала. Обзоры [70, 71] показывают, что ВОД заняли устойчивое место в задачах мониторинга технического состояния инфраструктуры, обеспечивая непрерывный контроль протяженных объектов. Следует отметить применение систем на основе обратного рэлеевского рассеяния как для эксплуатационного мониторинга, так и для контроля состояния конструкций на этапе строительства [72].

Важное значение имеет интерпретация получаемых с ВОД данных. Например, при оценке влияния близлежащего строительства на тоннель метрополитена в Барселоне [73]. Интерпретация данных, получаемых с ВОД, осуществлялась на основе сопоставления результатов измерения с расчетной моделью объекта. В железнодорожной инфраструктуре датчики на основе обратного рэлеевского рассеяния использовались для регистрации деформаций рельс в лабораторных и полевых условиях и показали перспективность таких систем не только для статического, но и для динамического мониторинга [74]. Для мостовых сооружений применение распределенных ВОД демонстрирует возможность длительного контроля трещин и зон риска в железобетонных элементах, в том числе при коррозионном растрескивании [75].

В медицине и биомеханике ВОД применяются как средство получения информации в условиях, где существенны гибкость чувствительного элемента, совместимость с медицинскими инструментами и мягкими тканями, а также минимальное влияние датчика на медицинскую процедуру. Существующие обзоры применения ВБР в биомеханике указывают на широкий круг возможных задач, от регистрации деформаций костей и давления в ортопедических суставах до измерения усилий в сухожилиях, углов сегментов тела при ходьбе и контактного давления [76]. Одним из наиболее развитых направлений является определение формы медицинских инструментов. В работе [77] показано, что распределенная регистрация деформаций методом OFDR может использоваться для отслеживания формы хирургических игл. В работе [78] продемонстрирована высокоточная система реконструкции формы гибкого инструмента на основе ВБР датчиков для задач эндоваскулярной навигации. Аналогичный подход реализован в работе [79] при реконструкции формы катетера для двумерного и трехмерного случаев. Применение распределенных ВОД позволяет отслеживать изгиб иглы и измерять ее кривизну при прохождении через среды различной жесткости [80]. ВБР, встроенные в мягкую полимерную матрицу на поршне шприца, обеспечивают регистрацию усилия и обнаружение потери сопротивления [81]. ВОД также используются как носимые чувствительные элементы. В работе [82] продемонстрирован датчик на основе ВБР для регистрации дыхания и сердечного ритма. Массив ВБР, встроенный в мягкую полимерную матрицу, использовался для многоточечной регистрации сейсмокардиографических сигналов на грудной клетке [83]. ВОД в носимых устройствах используются для мониторинга движений пальцев и суставов, тактильных воздействий, физиологических параметров и взаимодействия пациента с реабилитационными устройствами, но при этом остаются проблемы, связанные с гибкостью системы, стоимостью и интеграцией в практические устройства [84, 85].

Основные проблемы измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками

В большинстве применений ВОД для мониторинга механического состояния объектов оптическое волокно размещается на поверхности объекта контроля. В данном случае актуальными являются вопросы передачи деформаций от исходного материала конструкции к оптическому волокну. Особенно это важно для вариантов, когда ВОД заключен в другие буферные элементы с интерфейсными слоями. В этом случае деформация, регистрируемая датчиком, может отличаться от деформации материала в зоне его установки. Для количественного учета этого эффекта обычно используют коэффициент передачи деформации.

В работе [86] рассмотрена трехслойная модель передачи деформаций, включающая подложку, адгезионный слой и оптическое волокно, закрепленное на поверхности подложки. Для этой модели приведены количественные оценки влияния модуля сдвига адгезионного материала, толщины клеевого слоя и длины приклеенного участка волокна на коэффициент передачи деформации от подложки к оптическому волокну с полиимидным покрытием и записанной ВБР. Показано, что приклеенное волокно с полиимидным покрытием может обеспечивать высокий коэффициент передачи деформаций и достоверно регистрировать деформацию контролируемого объекта. В работах [87, 88] показано, что оптическое волокно с акрилатной оболочкой существенно уступает волокну с полиимидным покрытием по эффективности передачи деформаций.

Численные и экспериментальные исследования коэффициента передачи деформаций для точечных датчиков, приклеенных к поверхности контролируемого материала, представлены в работах [89–91]. С использованием метода конечных элементов выполнен многопараметрический анализ влияния длины и ширины зоны приклеивания, толщины клеевого слоя под волокном и над ним, наличия покрытия оптического волокна и механических свойств материала.

Особую сложность представляет передача деформации от композиционных анизотропных материалов. В работе [92] показано, что деформация, регистрируемая ВБР, отличается от деформации контролируемого материала, причем на коэффициент передачи влияют направление армирования, число слоев и последовательность их укладки, определяющие эффективные механические характеристики материала. Приводится апробация результатов при измерении деформаций в углепластике. ВБР датчики находят применение в элементах внешнего армирования строительных конструкций. В работе [93] рассмотрена схема, в которой оптическое волокно закрепляется на стеклопластиковой ленте, используемой для внешнего армирования железобетонного элемента, и датчик обеспечивает контроль соединения ленты с железобетоном. В результате исследований была определена длина сцепления оптического волокна в зоне ВБР, обеспечивающая необходимую чувствительность датчика. В работе [94] исследовано влияние кратковременной ползучести адгезионного соединения на передачу деформаций от углепластиковой полосы к волоконно-оптическому датчику на основе ВБР, закрепленному на ее поверхности. Рассмотрены эпоксидная смола, цианоакрилатный клей и их комбинация при разных длинах области приклеивания и уровнях длительной нагрузки. Показано, что при длительной постоянной нагрузке недостаточная длина приклеивания приводит к заметному снижению коэффициента передачи деформаций.

Передача деформации может зависеть не только от конструкции датчика и параметров адгезионного слоя, но и от режима нагружения. В работе [95] исследована передача деформаций при циклическом нагружении. Было показано, что коэффициент передачи деформаций при статическом нагружении выше, чем при динамическом режиме деформирования. Для рассматриваемой проблемы представляет интерес работа [96], в которой приведен обзор исследований, связанных с анализом передачи деформаций к ВОД, применяемым в гражданском строительстве.

Внедрение оптических волокон в структуру разных материалов открывает принципиально новые возможности для контроля состояния конструкций как в процессе эксплуатации, так и на этапах изготовления. Тем не менее, при использовании ВОД, встроенных в материал, возникает ряд проблем. Одна из них связана с анализом перераспределения напряженно-деформированного состояния, вызванного встраиванием в материал оптического волокна. В качестве примера можно отметить работу [97], в которой аналитическими методами исследуются напряжения и деформации в области оптического волокна, встроенного в ПКМ.

В ряде работ экспериментальными и численными методами анализируется геометрия смоляного кармана, которая является одним из ключевых факторов, определяющих перераспределение напряжений при встраивании оптического волокна в ПКМ. В одной из первых работ по данному вопросу [98] рассмотрен алгоритм минимизации полной потенциальной энергии с неизвестным распределением сил в слоях ПКМ и неизвестной длиной смоляного кармана. Результатом расчетов является оценка геометрии смоляного кармана в зависимости от последовательности укладки слоев, давления при изготовлении и диаметра оптического волокна. Результаты численного анализа находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными. В работе [99] приведены результаты конечно-элементного моделирования геометрии смоляного кармана, окружающего оптическое волокно в однонаправленных композиционных материалах на основе препрегов, при расположении оптического волокна перпендикулярно армирующим волокнам. Результаты численного моделирования подтверждаются изображениями срезов образцов однонаправленных композиционных материалов со встроенным оптическим волокном. На основе экспериментальных данных в работе [100] дана оценка геометрических размеров смоляного кармана в слоистом композиционном материале с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно направлению армирования. В частности, показано, что длина смоляного кармана может в 16 раз превышать диаметр оптического волокна.

Геометрия смоляного кармана существенно зависит от ориентации оптического волокна относительно направления армирования. В работе [101] приведены экспериментальные данные о форме смоляного кармана при различных углах между оптическим волокном и направлением армирования. Отмечается, что при нулевом угле смоляной карман отсутствует, при угле 90° он близок к классической симметричной форме, а при других углах наблюдаются отличия в размерах смоляного кармана и нарушение его симметрии. В работе [102] исследовано влияние угла ориентации встроенного оптического волокна, температуры и давления предварительного формования ПКМ на геометрию смоляного кармана. Установлено, что длина и площадь смоляного кармана увеличиваются с ростом угла ориентации оптического волокна по синусоидальному закону, тогда как повышение температуры

и давления предварительного формования приводит к их приблизительно линейному уменьшению. В отличие от большинства исследований, посвященных внедрению оптического волокна в композиты с однонаправленным армированием, в работе [103] рассмотрен композит с плетеной структурой армирования. Экспериментальное исследование локальной внутренней структуры материала в окрестности встроенного оптического волокна не выявило формирования смоляного кармана существенных размеров.

В обзоре [104] отмечается, что внедрение оптического волокна в ПКМ неизбежно приводит к концентрации напряжений и деформаций вокруг датчиков. В исследовании [97] рассмотрена задача о плоско-деформированном состоянии для оптического волокна, встроенного в однородный трансверсально-изотропный материал. Полученные результаты могут быть полезны при тестировании численных алгоритмов. Одним из примеров приложения численных методов для оценки напряженного состояния в области оптического волокна является работа [100], в которой рассматривается слоистый композиционный материал с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно армирующим волокнам и окруженным смоляным карманом, имеющим классическую форму в виде глаза. При численном моделировании материал рассматривается как однородная среда. Отмечается, что при нагружении вдоль армирующих волокон имеет место концентрация напряжений в устье смоляного кармана. Приводятся результаты, имитирующие разрушение в рамках критерия максимальных напряжений. Следует отметить, что приведенные результаты применимы только для композитов с одним направлением армирования. С точки зрения моделирования, практически идентичная задача с аналогичными выводами рассмотрена в источниках [105, 106] для ПКМ с микрососудными каналами. Отличие от предыдущей работы состоит в том, что вместо оптического волокна имеется полость, незаполненная материалом. В работе [107] численно исследуется напряженное состояние в области внедренного в ПКМ оптического волокна при разных вариантах представления материала и ориентациях армирования смежных с оптическим волокном слоев ПКМ. Показано, что использование слоистой модели представления ПКМ предпочтительно для численной оценки концентрации напряжений в окрестности встроенного оптического волокна.

Представляет интерес сравнительный анализ конечно-элементных результатов и экспериментальных данных на основе муаровой интерферометрии, показывающий количественное согласование между экспериментом и расчетом. Численное моделирование [108] позволило определить оптимальные для датчиков свойства покрытия, минимизирующие уровень концентрации напряжений вокруг датчиков. Примером исследования результатов внедрения оптических волокон в материал является работа [109], в которой дается оценка изменения механических свойств при статическом деформировании углепластикового композита, произведенного по препреговой технологии. Следует отметить работу [110], в которой оценивается влияние встроенных оптических волокон на механические характеристики композита при различных видах механических испытаний: ударных, статических испытаниях на изгиб и усталостных испытаниях. Приведенные данные представляют ценность для интерпретации численных результатов.

При использовании встроенных в материал ВОД возникает ряд проблем, связанных с обеспечением достоверности значений деформаций, вычисленных на основе регистрируемой датчиком физической величины – резонансной длины волны

отраженного сигнала. Одна из проблем состоит в том, что известные соотношения между сдвигом резонансной длины волны отраженного сигнала и компонентами тензора деформаций в зоне брэгговской решетки имеют единственное решение относительно значения деформации вдоль волокна только при условии одноосного напряженного состояния в оптическом волокне. Во встроенном в материал оптическом волокне, как правило, имеет место сложнонапряженное состояние. Кроме того, для получения достоверных результатов измерений ВОД необходимо обеспечить совпадение деформаций вдоль оптического волокна в материале и в зоне брэгговской решетки.

В работе [111] рассмотрены особенности передачи деформации от материала к встроенному волоконно-оптическому датчику. Приводятся экспериментальные данные, демонстрирующие, что при определенных видах нагружений наблюдаются сильные эффекты двулучепреломления. Показано, что передача деформаций зависит от механических свойств как принимающего материала, так и датчика, а также от схемы укладки композитного материала и положения датчика в определенном слое. В работе [112] представлен обзор проблемы передачи деформаций для распределенных ВОД, внедренных в материал. Обсуждаются механизмы передачи деформаций между конструкцией и оптическим волокном, факторы, влияющие на эффективность передачи деформаций. Авторы подчеркивают, что, в отличие от точечных датчиков, при использовании распределенных ВОД необходимо учитывать характер распределения деформации вдоль длины волокна.

В обзорной работе [113] отмечается, что встроенная ВБР находится в условиях сложнонапряженного состояния и, следовательно, необходимо вводить калибровочные коэффициенты для соответствующих деформаций. Задачи, связанные с калибровкой, подробно рассматриваются в работах [17, 114]. В работе [115] отмечается, что при значительных радиальных деформациях результаты измерений, полученные на основе показаний ВБР, существенно отклоняются от фактических деформаций в материале. Для получения достоверных результатов предлагается калибровать каждый датчик после встраивания в материал или располагать оптическое волокно вдоль максимальных деформаций.

Отраженный оптический спектр ВБР демонстрирует зависимость не только от продольных деформаций, но и от поперечных, а также от распределения деформаций вдоль длины датчика [116, 117]. Известно, что наличие значительных поперечных деформаций приводит к изменению формы спектра и раздвоению резонансного пика. Помимо потенциального источника погрешности измерений, данная особенность может быть использована для одновременного измерения продольных и поперечных деформаций [118, 119].

Одним из способов снижения влияния поперечных деформаций является конструктивная изоляция брэгговской решетки от окружающего материала [120, 121]. В работе [122] описано, как для этой цели использован капилляр в области расположения брэгговской решетки. Такая схема приводит к одноосному напряженному состоянию в области решетки. Для того, чтобы обеспечить чувствительность ВБР к сжимающим деформациям, проводится предварительное натяжение оптического волокна. Заключение брэгговской решетки в капилляр обеспечивает сохранение единственного пика на отраженном спектре после осуществления технологического процесса производства композитного материала. Работоспособность данного подхода продемонстрирована

при измерении полей деформаций в углепластиковых образцах. В работе [123] показано, как капилляр используется для увеличения температурной чувствительности ВОД. Авторы демонстрируют применимость предложенного подхода на различных ВБР, заключенных в капилляр из цинка с разными материалами связующего. Для обеспечения избирательной чувствительности к различным физическим величинам также разрабатываются гибридные датчики на основе ВБР [124].

В качестве конструктивных решений в работах [125, 126] для получения достоверной информации о продольной и поперечных компонентах тензора деформаций предлагается использование пары микроструктурированных оптических волокон с ВБР, определенным образом ориентированных относительно друг друга. Приводятся аналитическая и численная модели датчика, которые экспериментально апробированы на слоистых композитах. В работе [127] предложено использовать передаточную матрицу для пересчета измеренных деформаций в реальные деформации материала контролируемого объекта. Демонстрируется важность перевода измеренных деформаций в реальные деформации материала контролируемого объекта, которые могут значительно отличаться друг от друга.

Важным фактором, влияющим на форму отраженного спектра ВБР, является наличие градиента деформаций вдоль длины решетки. В работе [128] с использованием численного моделирования спектра ВБР на основе теории связанных мод продемонстрировано влияние градиента деформаций на форму спектра ВБР, заключающееся в его уширении с ростом градиента. В работе [129] выполнен анализ эффективности различных алгоритмов определения сдвига отраженного спектра ВБР при разных сценариях изменения его формы. Экспериментальные исследования отраженных спектров ВБР длиной от 2 до 15 мм, записанных с помощью фазовой маски и методом поточечной записи фемтосекундным лазером и находящихся в условиях градиента деформаций, приведены в работах [117, 130]. Авторы делают вывод об увеличении ширины спектра при росте градиента деформаций и возможности снижения влияния градиента деформаций за счет уменьшения длины ВБР. Аналогичная проблема выявлена в работе [131], где при измерении деформаций при изгибе композитного элемента парусной лодки погрешность показаний встроенных ВБР связывается с наличием градиента деформаций вдоль решетки длиной 10 мм.

Градиент деформаций в зоне расположения ВБР может возникать как в результате особенностей геометрии конструкции или наличия дефектов, например, в виде трещин [132], так и вследствие особенностей структуры материала. Особенно ярко влияние структуры материала на возникновение локальных неоднородностей деформаций проявляется для композитных материалов. В работе [116] исследовано влияние неоднородного распределения деформаций в композитном материале с саржевым плетением на отраженный спектр ВБР различной длины. Неоднородное поле деформаций, возникающее вследствие особенностей структуры материала, измерялось с помощью метода цифровой корреляции изображений. Показано, что форма отраженного спектра ВБР длиной 1 мм слабо зависит от градиента деформаций в пределах единичной ячейки материала, однако показания такой решетки имеют локальный характер и не отражают усредненной картины деформаций материала. Увеличение длины ВБР позволяет получить более усредненные значения деформаций материала, но одновременно делает спектральный отклик более чувствительным к неоднородному распределению деформаций вдоль решетки.

Изменение формы отраженного спектра ВБР может приводить к погрешностям при вычислении деформации по регистрируемым спектральным характеристикам [133]. В работе [134] описана методика получения распределения деформаций, основанная на результатах измерения отраженного оптического спектра ВБР. Разработанный подход позволяет рассчитывать влияние пространственно неоднородных полей деформаций на спектры отражения брэгговских решеток. В работе [135] этот метод был проверен экспериментально и усовершенствован для приложений с высокими градиентами деформаций. Влияние градиента деформаций на погрешность их измерения при использовании различных типов распределенных ВОД обсуждается в работах [136, 137].

Использование ВОД на основе ВБР осуществляется в широком диапазоне температур и относительной влажности воздуха, при которых ВОД должны сохранять работоспособность и обеспечивать достоверность и стабильность измерений. В работе [138] показано, что отражательная способность ВБР, записанной в легированном германием оптическом волокне, снижается с увеличением температуры, вплоть до полной потери сигнала от датчика при температуре 850°C. Для оптического волокна без защитной оболочки основное снижение отражательной способности наблюдается после 200°C. Продемонстрирована нелинейная зависимость сдвига резонансной длины волны ВБР, записанной в оптическом волокне с позолоченной оболочкой в диапазоне температур 600-800°C. Нелинейный характер зависимости сдвига резонансной длины волны ВБР от температуры исследуется в работах [139, 140]. В работе [141] описаны эксперименты по регистрации деформаций ВОД на брэгговских решетках при статическом нагружении в течение длительного промежутка времени (от 550 до 900 ч) при различной относительной влажности и температуре окружающей среды. Результаты испытаний показали, что ВОД при различной влажности и температуре, и нагрузках, близких к предельным для испытываемых датчиков, изменяют свои показания в малых пределах. Данный результат свидетельствует о возможности эффективного использования волоконно-оптических датчиков на основе ВБР для проведения долговременных измерений деформаций в диапазоне температур окружающей среды от -40 до + 80°C и относительной влажности воздуха от 5 до 95%.

В работе [142] приводятся исследования применения регенерированных ВБР для высокотемпературных приложений. Анализ экспериментальных результатов по выдержке исследуемых ВБР в течение 9000 часов при температурах от 760 °C до 890 °C показал значительное изменение как отражательной способности ВБР, так и сдвига резонансной длины волны. В работе [143] отмечается, что на стабильность показаний ВБР датчиков также влияет расстояние от анализатора сигналов до брэгговской решетки. Авторы демонстрируют заметный разброс резонансной длины волны и мощности отраженного сигнала при расположении ВБР на расстоянии 25 км от интеррогатора. Для стабилизации показаний предложена волоконно-оптическая схема с использованием кольцевого лазера на легированном эрбием волокне.

Аналогичные исследования на проверку работоспособности ВБР проводились для отрицательных температур, в том числе и криогенных. Так, в работе [144] представлена модель, описывающая поведение оптического волокна, покрытого металлом. Металлическая оболочка служит как для защиты ВБР, так и в качестве исполнительного механизма для повышения чувствительности ВБР к изменению температуры. Работоспособность волоконно-оптических датчиков при криогенных температурах

открывает возможности для таких приложений, как мониторинг хранения сжиженного природного газа [145] с помощью сенсоров на основе ВБР, а так же для разработки сенсорных систем, работающих в космическом пространстве и в криогенных средах с несколькими источниками электромагнитных помех, таких как сверхпроводящие магниты [146–148].

Достижение стабильных и точных измерений деформации с помощью ВОД остается сложной задачей. Так, для распределенных ВОД, сигналы рэлеевского обратного рассеяния по своей природе подвержены влиянию интенсивностных и фазовых шумов, амплитудных искажений и случайных пропадания сигнала, что усложняет спектральный корреляционный анализ, приводя к выбросам, пропущенным значениям, а также пространственному и временному шуму в данных о распределении деформаций [137, 149]. Даже в средах с минимальными внешними механическими воздействиями эти источники шума могут скрывать едва заметные вариации деформаций или вносить ложные аномалии [150, 151].

Для решения этих проблем применяются различные подходы [152]. Было показано, что оптимизация покрытий волокна и клеевых составов снижает несоответствия при передаче деформаций [153]. Некоторые из эффективных подходов включают специализированное обнаружение выбросов [149], извлечение локальных признаков [154] и вейвлетное шумоподавление [155]. Кроме того, методы, основанные на машинном обучении, продемонстрировали потенциал для снижения шума в реальном времени и обнаружения аномалий [156]. Тем не менее, поиск компромисса между высоким пространственным разрешением, быстрой обработкой и широким диапазоном измерения деформации остается актуальной задачей [150].

Перспективные направления применения волоконно-оптических датчиков

Одним из перспективных направлений является определение модальных характеристик конструкции по результатам измерения динамических деформаций (strain modal testing, SMT). Преимущество такого подхода по сравнению с традиционным модальным анализом, основанным на измерении перемещений или ускорений, связано с тем, что деформации и деформированные формы конструкции более чувствительны к изменению ее жесткости, а следовательно, и к появлению локальных дефектов. В настоящем обзоре рассмотрение динамических измерений ограничено точечными ВОД на основе ВБР и распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, реализуемыми методом OFDR. При этом следует отметить, что для задач регистрации динамических, вибрационных и акустических воздействий важное место занимают распределенные акустические волоконно-оптические датчики (distributed acoustic sensing, DAS). Подробный анализ принципов работы, областей применения и перспектив развития DAS можно найти в работах [157, 158]. Экспериментальные исследования с использованием ВБР датчиков показывают, что динамические деформации, зарегистрированные встроенными или закрепленными на поверхности датчиками, могут использоваться для определения собственных частот, деформационных форм колебаний и других параметров модального анализа в различных конструкциях [159, 160]. При малых амплитудах эксплуатационных колебаний существенным становится не только качество самого чувствительного элемента, но и способ обработки оптического сигнала. Так, в работе [161] продемонстрирована возможность измерения уровня деформаций менее 1 мкм/м при колебании конструкции, за счет усовершенствованного алгоритма определения сдвига спектра ВБР.

Распределенные методы на основе рэлеевского рассеяния и OFDR позволяют перейти от регистрации динамического отклика в отдельных точках конструкции к анализу пространственного распределения деформаций вдоль измерительной линии. В работе [162] продемонстрирована динамическая система распределенного измерения деформаций на основе рэлеевского рассеяния. Возможности системы показаны на примере регистрации отклика оптического волокна на локальные импульсные нагрузки и гармоническое воздействие. В работе [163] показаны присущие распределенным динамическим системам на основе OFDR компромиссы между пространственным разрешением, длиной измерительной линии, скоростью сканирования и динамическим диапазоном. В прикладной демонстрации на модели лопасти вертолета использование протяженной ВБР длиной 5 м, изготовленной с помощью последовательной записи 10 см решеток, опрашиваемой методом OFDR, позволило получить распределенный деформационный отклик при вибрационном возбуждении, рассчитать прогибы и определить модальные параметры конструкции [164].

Важной задачей динамических измерений с помощью ВОД является восстановление деформированной формы конструкции или поля перемещений по измеренным деформациям. В экспериментах с консольной балкой и пластиной распределенные волоконно-оптические измерения применялись для оценки статической и динамической деформированной формы конструкции, что рассматривается как основа для применения подобных систем в гибких аэрокосмических элементах [165]. В отдельных исследованиях распределенные измерения деформаций рассматриваются в связи с концепцией цифровых двойников: распределенные ВОД в этом случае служат источником экспериментальных данных, на основе которых численная модель конструкции уточняет оценку ее текущей деформированной формы в реальном времени [166].

Отдельное направление связано с использованием ВОД в системах активного управления и диагностики динамического состояния конструкций. В таких задачах деформационный отклик рассматривается не только как результат измерения, но и как входная информация для расчета управляющего воздействия. В частности, массивы ВБР применялись в системах активного подавления вибраций смарт-конструкций [167]. Для распределенных динамических систем актуальны задачи локализации внешних воздействий и сохранения достаточного динамического диапазона измерений. Так, в работе [168] предложен подход, при котором амплитуда вибраций определяется по гармоническим составляющим сигнала распределенного датчика, что позволяет расширить диапазон измерения при больших деформациях.

Конструктивные особенности ВОД, позволяющие встраивать их в материалы, дают уникальные возможности для регистрации технологических и остаточных деформаций, которые не могут быть получены другими известными методами и при использовании других типов датчиков. В отличие от традиционных методов контроля, которые обычно позволяют оценивать остаточное напряженно-деформированное состояние после завершения технологического процесса, встроенные ВОД дают возможность регистрировать изменение деформированного состояния непосредственно во время технологического процесса формирования материала. Это особенно важно для полимерных композиционных материалов и изделий, полученных методами аддитивного производства, где остаточные

деформации могут приводить к короблению, отклонению геометрических размеров от проектных значений и ухудшению эксплуатационных характеристик изделия.

В обзорных работах [113, 169] подчеркивается, что встроенные ВБР позволяют измерять внутренние деформации слоистых композитных материалов, однако достоверность таких измерений зависит от условий встраивания, передачи деформаций от матрицы к волокну, перекрестной чувствительности к температуре и деформациям и особенностей спектрального отклика решетки.

В задачах мониторинга отверждения композитов ВОД применяются для регистрации изменений температуры и деформаций на различных стадиях технологического цикла. В ранних работах было показано, что встроенные волоконно-оптические датчики могут использоваться для контроля процесса отверждения композитных материалов и регистрации изменения состояния материала в процессе формирования его структуры [170]. В исследовании [171] предложена схема одновременного измерения температуры и деформации при отверждении слоистых ПКМ с использованием гибридных ВБР/Фабри-Перо датчиков, что позволило разделять температурный и механический вклады в измеряемый сигнал. В работе [172] предложен вариант мониторинга отверждения стеклопластиков. Авторы использовали две связанные ВБР, встроенные в композитный ламинат, для одновременного измерения температуры и деформации во время отверждения композитного материала.

Для слоистых композитов важно учитывать пространственную неоднородность технологических деформаций, поскольку остаточное состояние может различаться по толщине материала, между слоями с разной ориентацией волокон и в локальных зонах концентрации деформаций. В работе [173] описано, как распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния и OFDR были использованы для мониторинга технологических деформаций в процессе отверждения слоистого композитного материала.

В последние годы ВОД начали активно применяться для исследования технологических и остаточных деформаций в изделиях, изготовленных методами аддитивного производства. При 3D-печати остаточные деформации формируются вследствие послойного нагрева и охлаждения, термической усадки, повторного нагрева ранее напечатанных слоев и ограничений со стороны подложки. Для метода послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM) это может приводить к короблению, отрыву от платформы и изменению геометрии изделия. В работе [174] представлено, как для измерения остаточных деформаций в образцах, изготовленных методом послойного наплавления, могут быть использованы распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния, встроенные в процессе печати. Авторы показали возможность регистрации распределения остаточных деформаций внутри 3D-печатных термопластичных образцов и сопоставили результаты измерений с численным моделированием. Другой подход был предложен в исследовании [175], где остаточные напряжения в напечатанных элементах определялись на основе механической модели, в которой используются значения деформаций в подложке, измеряемые ВОД.

При использовании ВОД в аддитивном производстве отдельной проблемой является качество встраивания датчика в печатный материал. Способ размещения волокна, наличие канала, адгезия между покрытием волокна и полимером, локальное нарушение траектории печати и изменение структуры материала вокруг датчика могут

влиять как на сам процесс изготовления, так и на передачу деформаций к чувствительному элементу. Авторами работы [176] исследованы методы встраивания ВБР с полиимидным покрытием в PLA-матрицу при 3D-печати методом послойного наплавления и показана связь между межфазным сцеплением и передачей деформаций.

Заключение

Проведенный обзор демонстрирует, что волоконно-оптические датчики на основе волоконных брэгговских решеток и распределенные датчики на основе рэлеевского рассеяния являются эффективным инструментом измерения деформаций в задачах мониторинга механического состояния конструкций.

Анализ работ показал, что достоверность значений деформаций, измеряемых ВОД, определяется не только характеристиками датчика и измерительной системы, но и условиями его размещения в материале или на поверхности конструкции. Наибольшее влияние оказывают передача деформаций от контролируемого объекта к оптическому волокну, температурная чувствительность, поперечные деформации, сложнапряженное состояние в области датчика, градиенты деформаций и особенности обработки оптического сигнала.

Наиболее сложной остается интерпретация показаний, встроенных в материал ВОД, поскольку внедрение оптического волокна может изменять локальную структуру и напряженно-деформированное состояние материала.

Перспективы дальнейшего развития ВОД связаны с повышением достоверности измерений в неоднородных и нестационарных полях деформаций, совершенствованием методов температурной компенсации, развитием распределенных динамических измерений, интеграцией данных в цифровые двойники и использованием ВОД для контроля состояния материалов непосредственно в процессе изготовления.

Библиографический список

1. *Hecht J.* Laser pioneers. – Rev. ed. – Boston San Diego New York [etc.]: Academic press, 1992. – 298 p.
2. *Kao K.C., Hockham G.A.* Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies // *Proc. Inst. Electr. Eng.* – 1966. – Vol. 113. – № 7. – P. 1151–1158. <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189>
3. *Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D.* Radiation losses in glass optical waveguides // *Appl. Phys. Lett.* – 1970. – Vol. 17. – № 10. – P. 423–425. <https://doi.org/10.1063/1.1653255>
4. *Udd E.* Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. – New York: Wiley-Interscience, 2006. – 476 p.
5. *Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – Vol. 32. – № 10. – P. 647–649. <https://doi.org/10.1063/1.89881>
6. *Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H.* Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Opt. Lett.* – 1989. – Vol. 14. – № 15. – P. 823. <https://doi.org/10.1364/OL.14.000823>
7. *Kashyap R.* Fiber Bragg gratings. – 2nd ed. – Burlington, MA: Academic Press, 2010. – 614 p.
8. *Measures R.M.* Structural monitoring with fiber optic technology. – San Diego, Calif: Academic, 2001. – 716 p.
9. *Gafsi R., El-Sherif M.A.* Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings // *Opt. Fiber Technol.* – 2000. – Vol. 6. – № 3. – P. 299–323. <https://doi.org/10.1006/ofte.2000.0333>

10. *Bertholds A., Dändliker R.* Determination of Individual Strain-Optic Coefficients in Single-Mode Optical Fibers // *Light. Technol. J. Of.* – 1988. – Vol. 6. – P. 17–20. <https://doi.org/10.1109/50.3956>
11. *Rego G.M.* Temperature Dependence of the Thermo-Optic Coefficient of GeO₂-Doped Silica Glass Fiber // *Sensors.* – 2024. – Vol. 24. – № 15. – P. 4857. <https://doi.org/10.3390/s24154857>
12. *Othonos A., Kalli K., Pureur D., Mugnier A.* Fibre Bragg Gratings // *Wavelength Filters in Fibre Optics.* / ed. Venghaus H. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – Vol. 123. – P. 189–269. https://doi.org/10.1007/3-540-31770-8_6
13. *Pendão C., Silva I.* Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications // *Sensors.* – 2022. – Vol. 22. – № 19. – P. 7554. <https://doi.org/10.3390/s22197554>
14. *Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – № 2. – P. 666. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>
15. *Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpene B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R.* Distributed optical fiber sensing: Review and perspective // *Appl. Phys. Rev.* – 2019. – Vol. 6. – № 4. – P. 041302. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
16. *Turov A., Fotiadi A., Korobko D., Panyaev I., Belokrylov M., Barkov F., Konstantinov Y., Kambur D., Sakhabutdinov A., Qaid M.* A Review of Multiparameter Fiber-Optic Distributed Sensing Techniques for Simultaneous Measurement of Temperature, Strain, and Environmental Effects // *Sensors.* – 2025. – Vol. 25. – № 23. – P. 7225. <https://doi.org/10.3390/s25237225>
17. *Di Sante R.* Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // *Sensors.* – 2015. – Vol. 15. – № 8. – P. 18666–18713. <https://doi.org/10.3390/s150818666>
18. *Davis C., Knowles M., Rajic N., Swanton G.* Evaluation of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System for Full-Scale Fatigue Testing // *Procedia Struct. Integr.* – 2016. – Vol. 2. – P. 3784–3791. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.471>
19. *Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A.* Measurement of Gradient Strain Fields with Fiber-Optic Sensors // *Sensors.* – 2022. – Vol. 23. – № 1. – P. 410. <https://doi.org/10.3390/s23010410>
20. *Cheng L., Cigada A., Lang Z.-Q., Zappa E.* Calibrating static measurement data from distributed fiber optics by the integration of limited FBG sensors based on the extended kernel regression method // *Meas. Sci. Technol.* – 2019. – Vol. 30. – № 12. – P. 125102. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/b3530>
21. *Matveenko V., Serovaev G.* Distributed Strain Measurements Based on Rayleigh Scattering in the Presence of Fiber Bragg Gratings in an Optical Fiber // *Photonics.* – 2023. – Vol. 10. – № 8. – P. 868. <https://doi.org/10.3390/photonics10080868>
22. *Chen B., Yang J., Li A., Zhang M., Li J., Wang Z.* Strain Measurement Technology and Precision Calibration Experiment Based on Flexible Sensing Fiber // *Sensors.* – 2024. – Vol. 24. – № 12. – P. 3811. <https://doi.org/10.3390/s24123811>
23. *Campanella C.E., Cuccovillo A., Campanella C., Yurt A., Passaro V.M.N.* Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications // *Sensors.* – 2018. – Vol. 18. – № 9. – P. 3115. <https://doi.org/10.3390/s18093115>
24. *Takeda N.* Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures // *Proc. 26th Int. Congr. Aeronaut. Sci.* – 2008. – P. 1–12.
25. *Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Yu., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I.* Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials // *Polym. Sci. Ser. D.* – 2011. – Vol. 4. – № 3. – P. 246–251. <https://doi.org/10.1134/S1995421211030063>
26. *Li X.-X., Ren W.-X., Bi K.-M.* FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation // *Sens. Actuators Phys.* – 2015. – Vol. 223. – P. 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.003>
27. *Kobayashi M., Ogino H., Burman M., Wada D., Igawa H., Murayama H.* Shape sensing for CFRP and aluminum honeycomb sandwich panel using inverse finite element method with distributed fiber-optic sensors // *Compos. Struct.* – 2023. – Vol. 308. – P. 116648. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116648>

28. Rocha H., Semprimoschnig C., Nunes J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review // *Eng. Struct.* – 2021. – Vol. 237. – P. 112231. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112231>
29. Güemes A., Fernández-López A., Díaz-Maroto P., Lozano A., Sierra-Perez J. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – № 4. – P. 1094. <https://doi.org/10.3390/s18041094>
30. Schenato L. A Review of Distributed Fibre Optic Sensors for Geo-Hydrological Applications // *Appl. Sci.* – 2017. – Vol. 7. – № 9. – P. 896. <https://doi.org/10.3390/app7090896>
31. Zheng Y., Zhu Z.-W., Xiao W., Deng Q.-X. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring // *Opt. Fiber Technol.* – 2020. – Vol. 54. – P. 102127. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127>
32. Li Y., Wang H., Cai W., Li S., Zhang Q. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors // *Measurement*. – 2020. – Vol. 153. – P. 107449. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107449>
33. Kashaganova G., Kozbakova A., Kartbayev T., Balbayev G., Togzhanova K., Alimseitova Z., Orzaliyeva S. Research of a Fiber Sensor Based on Fiber Bragg Grating for Road Surface Monitoring // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12. – № 11. – P. 2491. <https://doi.org/10.3390/electronics12112491>
34. Barrias A., Casas J., Villalba S. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – № 5. – P. 748. <https://doi.org/10.3390/s16050748>
35. Bado M.F., Casas J.R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 5. – P. 1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
36. Minardo A., Bernini R., Berruti G.M., Breglio G., Bruno F.A., Buontempo S., Campopiano S., Catalano E., Consales M., Coscetta A., Cusano A., Cutolo M.A., Di Palma P., Esposito F., Fienga F., Giordano M., Iele A., Iadicicco A., Irace A., Jannet M., Laudati A., Leone M., Maresca L., Marrazzo V.R., Pisco M., Quero G., Riccio M., Srivastava A., Vaiano P., Zeni L., Cutolo A. Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part I: Fundamentals, Infrastructural and Ground Transportations // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 5. – P. 2558. <https://doi.org/10.3390/s23052558>
37. Fedotov M.Yu., Budadin O.N., Kozel'Skaya S.O., Ovchinnikov I.G., Shelemba I.S. Strengthening by composite materials and optical monitoring of the reliability of operation of building structures (Review) // *Compos. Mater. Constr.* – 2022. – № 1. – P. 57–67. https://doi.org/10.52190/2073-2562_2022_1_57
38. Rodriguez-Ramirez D.A., Martinez-Angulo J.R., Filoteo-Razo J.D., Elizondo-Leal J.C., Diaz-Manriquez A., Jauregui-Vazquez D., Lauterio-Cruz J.P., Saldivar-Alonso V.P. Review of Optical Fiber Sensors: Principles, Classifications and Applications in Emerging Technologies // *Photonics*. – 2025. – Vol. 13. – № 1. – P. 40. <https://doi.org/10.3390/photonics13010040>
39. Cutolo A., Bernini R., Berruti G.M., Breglio G., Bruno F.A., Buontempo S., Catalano E., Consales M., Coscetta A., Cusano A., Cutolo M.A., Di Palma P., Esposito F., Fienga F., Giordano M., Iele A., Iadicicco A., Irace A., Jannet M., Laudati A., Leone M., Maresca L., Marrazzo V.R., Minardo A., Pisco M., Quero G., Riccio M., Srivastava A., Vaiano P., Zeni L., Campopiano S. Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part II: Aerospace and Submarine Applications // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 5. – P. 2417. <https://doi.org/10.3390/s23052417>
40. Iele A., Leone M., Consales M., Persiano G.V., Brindisi A., Ameduri S., Concilio A., Ciminello M., Apicella A., Bocchetto F., Cusano A. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors // *Sens. Actuators Phys.* – 2018. – Vol. 281. – P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.08.023>
41. Iadicicco A., Natale D., Palma P.D., Spinaci F., Apicella A., Campopiano S. Strain Monitoring of a Composite Drag Strut in Aircraft Landing Gear by Fiber Bragg Grating Sensors // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 10. – P. 2239. <https://doi.org/10.3390/s19102239>
42. Li H., LianQing Z., Gaungkai S., MingLi D., Junfei Q. Deflection monitoring of thin-walled wing spar subjected to bending load using multi-element FBG sensors // *Optik*. – 2018. – Vol. 164. – P. 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.067>

43. Kwon H., Park Y., Kim J.-H., Kim C.-G. Embedded fiber Bragg grating sensor-based wing load monitoring system for composite aircraft // *Struct. Health Monit.* – 2019. – Vol. 18. – № 4. – P. 1337–1351. <https://doi.org/10.1177/1475921719843772>
44. Klotz T., Pothier R., Walch D., Colombo T. Prediction of the business jet Global 7500 wing deformed shape using fiber Bragg gratings and neural network // *Results Eng.* – 2021. – Vol. 9. – P. 100190. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100190>
45. Nicolas M., Sullivan R., Richards W. Large Scale Applications Using FBG Sensors: Determination of In-Flight Loads and Shape of a Composite Aircraft Wing // *Aerospace.* – 2016. – Vol. 3. – № 3. – P. 18. <https://doi.org/10.3390/aerospace3030018>
46. Lee J.-R., Ryu C.-Y., Koo B.-Y., Kang S.-G., Hong C.-S., Kim C.-G. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system // *Smart Mater. Struct.* – 2003. – Vol. 12. – № 1. – P. 147–155. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/1/317>
47. Alvarez-Montoya J., Carvajal-Castrillón A., Sierra-Pérez J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition // *Mech. Syst. Signal Process.* – 2020. – Vol. 136. – P. 106526. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106526>
48. Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H., Murayama H., Shiotsubo K. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system // *Smart Mater. Struct.* – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 025014. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa588>
49. Ghoshal A., Ayers J., Gurvich M., Urban M., Bordick N. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles // *Compos. Part B Eng.* – 2015. – Vol. 71. – P. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.050>
50. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // *Труды ВИАМ.* – 2019. – № 5(77). – С. 52–61. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>
51. Goossens S., Berghmans F., Muñoz K., Jiménez M., Karachalios E., Saenz-Castillo D., Geernaert T. A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub-components with FBG-based sensors // *Compos. Struct.* – 2021. – Vol. 272. – P. 114025. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114025>
52. Jang B.-W., Kim C.-G. Real-time detection of low-velocity impact-induced delamination onset in composite laminates for efficient management of structural health // *Compos. Part B Eng.* – 2017. – Vol. 123. – P. 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.019>
53. Panettieri E., Fanteria D., Montemurro M., Froustey C. Low-velocity impact tests on carbon/epoxy composite laminates: A benchmark study // *Compos. Part B Eng.* – 2016. – Vol. 107. – P. 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.057>
54. Shardakov I.N., Shestakov A.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Epin V.V. The Study of Impact Loading on GFRP Plates Using a Network of Piezoceramic Sensors // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 581. – № 1. – P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/581/1/012030>
55. De Luca A., Caputo F., Sharif Khodaei Z., Aliabadi M.H. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves // *Compos. Part B Eng.* – 2018. – Vol. 138. – P. 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.042>
56. Bednarska K., Sobotka P., Woliński T.R., Zakręcka O., Pomianek W., Nocoń A., Lesiak P. Hybrid Fiber Optic Sensor Systems in Structural Health Monitoring in Aircraft Structures // *Materials.* – 2020. – Vol. 13. – № 10. – P. 2249. <https://doi.org/10.3390/ma13102249>
57. Barazanchy D., Martinez M., Rocha B., Yanishevsky M. A Hybrid Structural Health Monitoring System for the Detection and Localization of Damage in Composite Structures // *J. Sens.* – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/109403>
58. Gao Z., Xiaojin Z., Yubin F., Hesheng Z. Active monitoring and vibration control of smart structure aircraft based on FBG sensors and PZT actuators // *Aerosp. Sci. Technol.* – 2017. – Vol. 63. – P. 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.027>

59. Yang S.-M., Han J.-H., Lee I. Characteristics of smart composite wing with SMA actuators and optical fiber sensors // *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* – 2006. – Vol. 23. – № 3–4. – P. 177–186. <https://doi.org/10.3233/JAE-2006-736>
60. Mieloszyk M., Skarbek L., Krawczuk M., Ostachowicz W., Zak A. Application of fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of an adaptive wing // *Smart Mater. Struct.* – 2011. – Vol. 20. – № 12. – P. 125014. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125014>
61. Ma J., Pei H., Zhu H., Shi B., Yin J. A review of previous studies on the applications of fiber optic sensing technologies in geotechnical monitoring // *Rock Mech. Bull.* – 2023. – Vol. 2. – № 1. – P. 100021. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100021>
62. Johnson Singh M., Choudhary S., Chen W.-B., Wu P.-C., Kumar Goyal M., Rajput A., Borana L. Applications of fibre Bragg grating sensors for monitoring geotechnical structures: A comprehensive review // *Measurement.* – 2023. – Vol. 218. – P. 113171. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113171>
63. Huang A.-B., Wang C.-C., Lee J.-T., Ho Y.-T. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* – 2016. – Vol. 8. – № 4. – P. 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.007>
64. Zhang L., Shi B., Zeni L., Minardo A., Zhu H., Jia L. An Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Slope Deformation Studies in Geotechnical Centrifuges // *Sensors.* – 2019. – Vol. 19. – № 7. – P. 1591. <https://doi.org/10.3390/s19071591>
65. Schenato L., Palmieri L., Camporese M., Bersan S., Cola S., Pasuto A., Galtarossa A., Salandin P., Simonini P. Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 14686. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>
66. Chen Y., Tian Z.-G., Huang M.-L., Gao Y.-L., Wu Y.-J., Yan G.-H. Field application of BOFDA-based distributed fiber optic sensing in static load testing of cast-in-place pile foundations // *Front. Built Environ.* – 2025. – Vol. 11. – P. 1–23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1700987>
67. Румановский И.Г. Применение технологии распределенных оптоволоконных сенсоров для мониторинга геотехнических объектов // *Вестник ТОГУ.* – 2025. – № 4(79). – С. 59–78. <https://doi.org/10.38161/1996-3440-2025-4-59-78>
68. Gao Y., Zhu H., Qiao L., Liu X., Wei C., Zhang W. Feasibility study on sinkhole monitoring with fiber optic strain sensing nerves // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* – 2023. – Vol. 15. – № 11. – P. 3059–3070. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.026>
69. Anjana K., Herath M., Epaarachchi J. Optical fibre sensors for geohazard monitoring – A review // *Measurement.* – 2024. – Vol. 235. – P. 114846. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114846>
70. Ye X.W., Su Y.H., Han J.P. Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review // *Sci. World J.* – 2014. – Vol. 2014. – № 1. – P. 652329. <https://doi.org/10.1155/2014/652329>
71. Wu T., Liu G., Fu S., Xing F. Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure // *Sensors.* – 2020. – Vol. 20. – № 16. – P. 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>
72. Kishida K., Imai M., Kawabata J., Guzik A. Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures // *Sensors.* – 2022. – Vol. 22. – № 12. – P. 4368. <https://doi.org/10.3390/s22124368>
73. Gómez J., Casas J.R., Villalba S. Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity // *Autom. Constr.* – 2020. – Vol. 117. – P. 103261. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103261>
74. Wheeler L.N., Pannese E., Hoult N.A., Take W.A., Le H. Measurement of distributed dynamic rail strains using a Rayleigh backscatter based fiber optic sensor: Lab and field evaluation // *Transp. Geotech.* – 2018. – Vol. 14. – P. 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.002>
75. Bochenska M., Goldyn M., Zdanowicz K. Distributed Fiber Optic Sensing in Bridge Structural Health Monitoring: Insights from Real-Life Implementations in Germany // *E-J. Nondestruct. Test.* – 2025. – Vol. 30. – № 10. – P. 1–10. <https://doi.org/10.58286/31694>

76. *Al-Fakih E., Abu Osman N.A., Mahamd Adikan F.R.* The Use of Fiber Bragg Grating Sensors in Biomechanics and Rehabilitation Applications: The State-of-the-Art and Ongoing Research Topics // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12. – № 10. – P. 12890–12926. <https://doi.org/10.3390/s121012890>
77. *Parent F., Loranger S., Mandal K., Iezzi V.L., Lapointe J., Boisvert S., Baiad M.D., Kadoury S., Kashyap R.* Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers // *Biomed. Opt. Express*. – 2017. – Vol. 8. – № 4. – P. 2210–2221. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.002210>
78. *Jäckle S., Eixmann T., Schulz-Hildebrandt H., Hüttmann G., Pätz T.* Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation // *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* – 2019. – Vol. 14. – № 12. – P. 2137–2145. <https://doi.org/10.1007/s11548-019-02059-0>
79. *Chen X.-Y., Zhang Y.-N., Shen L.-Y., Qian J.-W., Fan J.-Y.* Fabrication and shape detection of a catheter using fiber Bragg grating // *Adv. Manuf.* – 2020. – Vol. 8. – № 1. – P. 107–118. <https://doi.org/10.1007/s40436-019-00284-z>
80. *Amantayeva A., Adilzhanova N., Issatayeva A., Blanc W., Molardi C., Tosi D.* Fiber Optic Distributed Sensing Network for Shape Sensing-Assisted Epidural Needle Guidance // *Biosensors*. – 2021. – № 11. – P. 446. <https://doi.org/10.3390/bios11110446>
81. *De Tommasi F., Lo Presti D., Virgili F., Massaroni C., Schena E., Carassiti M.* Soft System Based on Fiber Bragg Grating Sensor for Loss of Resistance Detection during Epidural Procedures: In Silico and In Vivo Assessment // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 16. – P. 5329. <https://doi.org/10.3390/s21165329>
82. *Nedoma J., Fajkus M., Martinek R., Nazeran H.* Vital Sign Monitoring and Cardiac Triggering at 1.5 Tesla: A Practical Solution by an MR-Ballistocardiography Fiber-Optic Sensor // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 3. – P. 470. <https://doi.org/10.3390/s19030470>
83. *Presti D.L., Santucci F., Massaroni C., Formica D., Setola R., Schena E.* A multi-point heart rate monitoring using a soft wearable system based on fiber optic technology // *Sci. Rep.* – 2021. – № 11. – P. 21162. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00574-2>
84. *Peng N., Meng W., Wei Q., Ai Q., Liu Q., Xie S.* Wearable Optical Fiber Sensors for Biomechanical Measurement in Medical Rehabilitation: A Review // *IEEE Sens. J.* – 2023. – Vol. 23. – № 12. – P. 12455–12469. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3273536>
85. *Li X., Li Y., Wei H., Wang C., Liu B.* A Review of Wearable Optical Fiber Sensors for Rehabilitation Monitoring // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – № 11. – P. 3602. <https://doi.org/10.3390/s24113602>
86. *Sun Y., Liu J., Wang Y., Zhang Q., Duan J., Zhang Z., Huang X., You Z.* Principles and Application of Polyimide Fiber Bragg Gratings for Surface Strain Measurement // *Appl. Sci.* – 2017. – Vol. 7. – № 10. – P. 995. <https://doi.org/10.3390/app7100995>
87. *Landreau C., Morana A., Ponthus N., Le Gall T., Charvin J., Girard S., Marin E.* Influence of Adhesive Bonding on the Dynamic and Static Strain Transfers of Fibre Optic Sensors // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 9. – P. 996. <https://doi.org/10.3390/photonics10090996>
88. *Chapeleau X., Bassil A.* A General Solution to Determine Strain Profile in the Core of Distributed Fiber Optic Sensors under Any Arbitrary Strain Fields // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 16. – P. 5423. <https://doi.org/10.3390/s21165423>
89. *Floris I., Sangiorgio V., Adam J.M., Uva G., Rapido M., Calderón P.A., Madrigal J.* Effects of bonding on the performance of optical fiber strain sensors // *Struct. Control Health Monit.* – 2021. – Vol. 28. – № 9. – P. e2782. <https://doi.org/10.1002/stc.2782>
90. *Wan K.T., Leung C.K.Y., Olson N.G.* Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors // *Smart Mater. Struct.* – 2008. – Vol. 17. – № 3. – P. 035037. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035037>
91. *Matveenko V., Serovaev G., Kosheleva N., Fedorov A.* Numerical and experimental analysis of the reliability of strain measured by surface-mounted fiber-optic sensors based on Bragg gratings // *Struct. Control Health Monit.* – 2022. – Vol. 29. – № 12. – P. e3142. <https://doi.org/10.1002/stc.3142>
92. *Wang Z., Li H., Zhang L., Xue J.* Strain Transfer Characteristic of a Fiber Bragg Grating Sensor Bonded to the Surface of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates // *Appl. Sci.* – 2018. – Vol. 8. – № 7. – P. 1171. <https://doi.org/10.3390/app8071171>

-
93. *Seo S.-Y., Park J.-H., Yun H.-D., Kim K.-S., Lee G.-C., Hong S.* Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor Externally Bonded to FRP Strip for Structural Monitoring after Reinforcement // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 4382. <https://doi.org/10.3390/ma14164382>
94. *Tran H.V., Seo S.-Y.* Short-Term Creep Effect on Strain Transfer from Fiber-Reinforced Polymer Strips to Fiber Bragg Grating-Optical Fiber Sensors // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 3. – P. 1628. <https://doi.org/10.3390/s23031628>
95. *Wang H.P., Xiang P., Li X.* Theoretical Analysis on Strain Transfer Error of FBG Sensors Attached on Steel Structures Subjected to Fatigue Load // *Strain*. – 2016. – Vol. 52. – № 6. – P. 522–530. <https://doi.org/10.1111/str.12195>
96. *Wang H., Xiang P., Jiang L.* Strain transfer theory of industrialized optical fiber-based sensors in civil engineering: A review on measurement accuracy, design and calibration // *Sens. Actuators Phys.* – 2019. – Vol. 285. – P. 414–426. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.019>
97. *Balać I., Milovančević M., Uskoković P., Aleksić R.* Stress field analysis around optical fiber embedded in composite laminae under transverse loading // *FME Trans.* – 2006. – Vol. 34. – P. 53–56.
98. *Dasgupta A., Wan Y., Sirkis J.S.* Prediction of resin pocket geometry for stress analysis of optical fibers embedded in laminated composites // *Smart Mater. Struct.* – 1992. – Vol. 1. – № 2. – P. 101–107. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/1/2/001>
99. *Lammens N., Luyckx G., Voet E., Van Paepegem W., Degrieck J.* Finite element prediction of resin pocket geometry around embedded optical fiber sensors in prepreg composites // *Compos. Struct.* – 2015. – Vol. 132. – P. 825–832. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.003>
100. *Shivakumar K., Bhargava A.* Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // *J. Compos. Mater.* – 2005. – Vol. 39. – № 9. – P. 777–798. <https://doi.org/10.1177/0021998305048156>
101. *Shivakumar K., Emmanwori L.* Mechanics of Failure of Composite Laminates with an Embedded Fiber Optic Sensor // *J. Compos. Mater.* – 2004. – Vol. 38. – № 8. – P. 669–680. <https://doi.org/10.1177/0021998304042393>
102. *Zhao Z., Zhang K., Liu C., Cheng H., Zou P., Feng M., Xiao J., Liang B.* Influence of processing parameters on the resin pocket geometry of smart composites embedded with Fiber Bragg Grating sensor and its fast prediction // *Polym. Compos.* – 2024. – Vol. 45. – P. 6214–6225. <https://doi.org/10.1002/pc.28190>
103. *Serovaev G., Kosheleva N.* The study of internal structure of woven glass and carbon fiber reinforced composite materials with embedded fiber-optic sensors // *Frat. Ed Integrità Strutt.* – 2020. – Vol. 14. – № 51. – P. 225–235. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.18>
104. *Zhou G., Sim L.M.* Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review // *Smart Mater. Struct.* – 2002. – Vol. 11. – № 6. – P. 925–939. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/6/314>
105. *Al-Shawk A., Tanabi H., Sabuncuoglu B.* Investigation of stress distributions in the resin rich region and failure behavior in glass fiber composites with microvascular channels under tensile loading // *Compos. Struct.* – 2018. – Vol. 192. – P. 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.061>
106. *Nguyen A.T.T., Orifici A.C.* Structural assessment of microvascular self-healing laminates using progressive damage finite element analysis // *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* – 2012. – Vol. 43. – № 11. – P. 1886–1894. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.005>
107. *Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S.* Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // *Compos. Struct.* – 2020. – Vol. 239. – P. 111844. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844>
108. *Lammens N., Luyckx G., Voet E., van Paepegem W., Degrieck J.* Optimization of coating diameter of fiber optic sensors embedded in composite structures under arbitrary loading conditions // *Smart Mater. Struct.* – 2015. – Vol. 24. – № 11. – P. 115003. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/115003>
109. *Hadzic R., John S., Herszberg I.* Structural integrity analysis of embedded optical fibres in composite structures // *Compos. Struct.* – 1999. – Vol. 47. – № 1–4. – P. 759–765. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00050-7)

110. *Silva J.M.A., Devezas T.C., Silva A.P., Ferreira J.A.M.* Mechanical Characterization of Composites with Embedded Optical Fibers // *J. Compos. Mater.* – 2005. – Vol. 39. – № 14. – P. 1261–1281. <https://doi.org/10.1177/0021998305050423>
111. *Luyckx G., Voet E., De Waele W., Degrieck J.* Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study // *Smart Mater. Struct.* – 2010. – Vol. 19. – № 10. – P. 105017. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/10/105017>
112. *Yan M., Tan X., Mahjoubi S., Bao Y.* Strain transfer effect on measurements with distributed fiber optic sensors // *Autom. Constr.* – 2022. – Vol. 139. – P. 104262. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104262>
113. *Luyckx G., Voet E., Lammens N., Degrieck J.* Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research // *Sensors.* – 2011. – Vol. 11. – P. 384–408. <https://doi.org/10.3390/s110100384>
114. *Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K.* Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications // *Sens. Actuators Phys.* – 2008. – Vol. 147. – № 1. – P. 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008>
115. *Fan Y., Kahrizi M.* Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure // *Sens. Actuators Phys.* – 2005. – Vol. 121. – № 2. – P. 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.021>
116. *Kharshiduzzaman M., Gianneo A., Bernasconi A.* Experimental analysis of the response of fiber Bragg grating sensors under non-uniform strain field in a twill woven composite // *J. Compos. Mater.* – 2019. – Vol. 53. – № 7. – P. 893–908. <https://doi.org/10.1177/0021998318793183>
117. *Kang D.H., Park S.O., Hong C.S., Kim C.G.* The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths // *NDT E Int.* – 2005. – Vol. 38. – № 8. – P. 712–718. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.006>
118. *Luyckx G., Voet E., Lammens N., De Waele W., Degrieck J.* Residual strain-induced birefringent FBGs for multi-axial strain monitoring of CFRP composite laminates // *NDT E Int.* – 2013. – Vol. 54. – P. 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.008>
119. *Udd E.* Review of multi-parameter fiber grating sensors // *Fiber Optic Sensors and Applications V*/ed. Udd E. – Bellingham, WA: SPIE, 2007. – Vol. 6770. – P. 677002. <https://doi.org/10.1117/12.753525>
120. *Kosheleva N., Matveenko V., Serovaev G., Fedorov A.* Numerical analysis of the strain values obtained by FBG embedded in a composite material using assumptions about uniaxial stress state of the optical fiber and capillary on the Bragg grating // *Frat. Ed Integrità Strutt.* – 2019. – Vol. 13. – № 49. – P. 177–189. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.19>
121. *Serovaev G., Matveenko V., Kosheleva N., Fedorov A.* Numerical modeling of the capillary in the Bragg grating area, ensuring uniaxial stress state of embedded fiber-optic strain sensor // *Procedia Struct. Integr.* – 2019. – Vol. 17. – P. 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.049>
122. *Voet E., Luyckx G., De Waele W., Degrieck J.* Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: II. Experimental validation // *Smart Mater. Struct.* – 2010. – Vol. 19. – № 10. – P. 105018. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/10/105018>
123. *Li Y., Wen C., Sun Y., Feng Y., Zhang H.* Capillary encapsulating of fiber Bragg grating and the associated sensing model // *Opt. Commun.* – 2014. – Vol. 333. – P. 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.07.068>
124. *Леонович Г.И., Олешкевич С.В.* Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках // *Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук.* – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 1340–1345.
125. *Sonnenfeld C., Luyckx G., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Gomina M., Chah K., Mergo P., Urbanczyk W., Thienpont H., Degrieck J., Berghmans F.* Microstructured optical fiber Bragg grating as an internal three-dimensional strain sensor for composite laminates // *Smart Mater. Struct.* – 2015. – Vol. 24. – № 5. – P. 055003. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055003>
126. *Sonnenfeld C., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Lammens N., Luyckx G., Voet E., Degrieck J., Urbanczyk W., Mergo P., Becker M., Bartelt H., Berghmans F., Thienpont H.* Microstructured optical fiber sensors embedded in a laminate composite for smart material applications // *Sensors.* – 2011. – Vol. 11. – № 3. – P. 2566–2579. <https://doi.org/10.3390/s110302566>

-
127. *Lammens N., Luyckx G., Degrieck J., De Waele W.* Experimental determination of the multi-axial strain transfer from CFRP-laminates to embedded Bragg sensor // *Smart Struct. Mater. 5th ECCOMAS Them. Conf. Proc.* – 2011. – P. 482–485.
128. *Hwang G.-S., Huang D.-W., Ma C.-C.* Numerical Study on Strain Measurements Using the Improved Bonding Fiber Bragg Grating // *IEEE Sens. J.* – 2010. – Vol. 10. – № 5. – P. 1012–1018. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2042954>
129. *Lamberti A., Vanlanduit S., De Pauw B., Berghmans F.* Influence of Fiber Bragg Grating Spectrum Degradation on the Performance of Sensor Interrogation Algorithms // *Sensors.* – 2014. – Vol. 14. – № 12. – P. 24258–24277. <https://doi.org/10.3390/s141224258>
130. *Matveenko V.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Galkina E.B.* Investigation of fiber Bragg grating's spectrum response to strain gradient // *Procedia Struct. Integr.* – 2024. – Vol. 54. – P. 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.076>
131. *Di Sante R., Donati L., Troiani E., Proli P.* Evaluation of bending strain measurements in a composite sailboat bowsprit with embedded fibre Bragg gratings // *Measurement.* – 2014. – Vol. 54. – P. 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.019>
132. *Zhang W., Zhang M., Wang X., Zhao Y., Jin B., Dai W.* The Analysis of FBG Central Wavelength Variation with Crack Propagation Based on a Self-Adaptive Multi-Peak Detection Algorithm // *Sensors.* – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 1056. <https://doi.org/10.3390/s19051056>
133. *Daggumati S., Van Paepegem W., Degrieck J., Xu J., Lomov S.V., Verpoest I.* Local damage in a 5-harness satin weave composite under static tension: Part II – Meso-FE modelling // *Compos. Sci. Technol.* – 2010. – Vol. 70. – № 13. – P. 1934–1941. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.07.002>
134. *Huang S., Ohn M.M., Measures R.M.* Phase-based Bragg intragrating distributed strain sensor // *Appl. Opt.* – 1996. – Vol. 35. – № 7. – P. 1135. <https://doi.org/10.1364/AO.35.001135>
135. *Peters K., Studer M., Botsis J., Iocco A., Limberger H., Salathé R.* Embedded optical fiber Bragg grating sensor in a nonuniform strain field: Measurements and simulations // *Exp. Mech.* – 2001. – Vol. 41. – № 1. – P. 19–28. <https://doi.org/10.1007/BF02323100>
136. *Serovaev G.S., Galkina E.B.* Strain Measurement in Heterogeneous Materials Using Distributed Fiber-Optic Sensors // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2025. – Vol. 89. – № S1. – P. S88–S94. <https://doi.org/10.1134/S1062873825713959>
137. *Luo L., Mei Y., Battista N., Kechavarzi C., Soga K.* Repeatability precision error analysis of the distributed fiber optic strain monitoring // *Struct. Control Health Monit.* – 2021. – Vol. 28. – № 8. – P. e2768. <https://doi.org/10.1002/stc.2768>
138. *Wu W., Liu X.* Investigation on high temperature characteristics of FBG sensors // *Optik.* – 2015. – Vol. 126. – № 20. – P. 2411–2413. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.009>
139. *Shestakov A., Shardakov I., Glot I., Yepin V., Gusev G., Tsvetkov R.* Estimation of the nonlinear dependence of the indications of a fiber Bragg grating on temperature and strain from experimental data // *Frat. Ed Integrità Strutt.* – 2022. – Vol. 16. – № 62. – P. 561–572. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.38>
140. *Aniskovich V.A., Budadin O.N., Kozelskaya S.O., Kutyurin Yu.G., Rykov A.N.* Identification of temperature sensitivity detector on fiber bragg grating (FBG) sensor // *Kontrol Diagn.* – 2022. – № 287. – P. 26–33. <https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.026-033>
141. *Сероваев Г.С., Кошелева Н.А.* Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках при различных климатических условиях // *Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета Механика.* – 2023. – № 4. – С. 101–109. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.4.10>
142. *Laffont G., Cotillard R., Ferdinand P.* 9000 hours-long high temperature annealing of regenerated fiber Bragg gratings // *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors / ed. Jaroszewicz L.R.* – Bellingham, WA: SPIE, 2013. – Vol. 8794. – P. 87941X. <https://doi.org/10.1117/12.2025838>
143. *Chang Y.-J., Yeh C.-H., Chow C.-W.* Reliability of stable fiber Bragg grating sensor system for monitoring temperature and strain individually // *Meas. Sci. Technol.* – 2019. – Vol. 30. – P. 105108. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab2290>

144. *Vendittozzi C., Felli F., Lupi C.* Modeling FBG sensors sensitivity from cryogenic temperatures to room temperature as a function of metal coating thickness // *Opt. Fiber Technol.* – 2018. – Vol. 42. – P. 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.02.017>
145. *Hong W., Shen S., Wang Z., Wang Z., Cai W.* A cryogenic sensor based on fiber Bragg grating for storage monitoring of liquefied natural gas // *Cryogenics.* – 2019. – Vol. 97. – P. 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.11.001>
146. *Rajinikumar R., Narayankhedkar K.G., Krieg G., Suber M., Nyilas A., Weiss K.P.* Fiber Bragg Gratings for Sensing Temperature and Stress in Superconducting Coils // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2006. – Vol. 6. – № 6. – P. 0600310. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864332>
147. *Baxter S., Lakrimi M., Thomas A.M., Gao Y., Blakes H., Gibbens P., Looi M.* Validation of a novel fiber optic strain gauge in a cryogenic and high magnetic field environment // *Cryogenics.* – 2010. – Vol. 50. – № 10. – P. 700–707. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.07.005>
148. *Chiuchiolo A., Bajko M., Perez J.C., Bajas H., Consales M., Giordano M., Breglio G., Cusano A.* Fiber Bragg Grating Cryosensors for Superconducting Accelerator Magnets // *IEEE Photonics J.* – 2014. – Vol. 6. – № 6. – P. 0600310. <https://doi.org/10.1109/jphot.2014.2343994>
149. *Richter B., Ulbrich L., Herbers M., Marx S.* Advances in Data Pre-Processing Methods for Distributed Fiber Optic Strain Sensing // *Sensors.* – 2024. – Vol. 24. – № 23. – P. 7454. <https://doi.org/10.3390/s24237454>
150. *Qu S., Wang Z., Qin Z., Xu Y., Cong Z., Liu Z.* Internet of Things Infrastructure Based on Fast, High Spatial Resolution, and Wide Measurement Range Distributed Optic-Fiber Sensors // *IEEE Internet Things J.* – 2022. – Vol. 9. – № 4. – P. 2882–2889. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3094272>
151. *Matveenko V.P., Serovaev G.S., Galkina E.B., Koniukhov V.A.* Statistical analysis of noise in distributed fiber-optic sensor strain measurements // *Procedia Struct. Integr.* – 2025. – Vol. 72. – P. 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.097>
152. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Claude D., Kambur D.A., Belokrylov M.E., Turov A.T., Korobko D.A.* Newest Methods and Approaches to Enhance the Performance of Optical Frequency-Domain Reflectometers // *Sensors.* – 2024. – Vol. 24. – № 16. – P. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>
153. *Du W., Zheng X., Shi B., Sun M., Wu H., Ni W., Zheng Z., Niu M.* Strain Transfer Mechanism in Surface-Bonded Distributed Fiber Optic Sensors under Different Strain Fields // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23. – № 15. – P. 6863. <https://doi.org/10.3390/s23156863>
154. *Lv Y., Xiao X., Li H., Ai K., Yan Z., Sun Q.* Strain measurement with adaptive local feature extraction method based on special fiber OFDR system // *Opt. Express.* – 2024. – Vol. 32. – № 4. – P. 5043. <https://doi.org/10.1364/OE.515302>
155. *Li P., Fu C., Du B., He J., Zhong H., Du C., Wang L., Wang Y.* High-Spatial-Resolution Strain Sensor Based on Distance Compensation and Image Wavelet Denoising Method in OFDR // *J. Light. Technol.* – 2021. – Vol. 39. – № 19. – P. 6334–6339. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3095851>
156. *Karapanagiotis C., Hicke K., Krebber K.* A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring // *Tm - Tech. Mess.* – 2023. – Vol. 90. – № 3. – P. 177–195. <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0098>
157. *Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A.* Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // *Sensors.* – 2022. – Vol. 22. – № 3. – P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
158. *Чугаев А.В., Санфиоров И.А., Кузнецов А.И., Богданов Р.А.* Сквaziнный сейсморазведочный мониторинг породного массива с применением оптоволоконных распределенных акустических датчиков // *Наука и технологические разработки.* – 2023. – Т. 102. – № 4. – P. 50–63. <https://doi.org/10.21455/std2023.4-3>
159. *Lamberti A., Chiesura G., Luyckx G., Degrieck J., Kaufmann M., Vanlanduit S.* Dynamic Strain Measurements on Automotive and Aeronautic Composite Components by Means of Embedded Fiber Bragg Grating Sensors // *Sensors.* – 2015. – Vol. 15. – № 10. – P. 27174–27200. <https://doi.org/10.3390/s151027174>

160. Huang J., Zhou Z., Zhang L., Chen J., Ji C., Pham D. Strain Modal Analysis of Small and Light Pipes Using Distributed Fibre Bragg Grating Sensors // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – № 10. – P. 1583. <https://doi.org/10.3390/s16101583>
161. Anastasopoulos D., Moretti P., Geernaert T., De Pauw B., Nawrot U., De Roeck G., Berghmans F., Reynders E. Identification of modal strains using sub-microstrain FBG data and a novel wavelength-shift detection algorithm // *Mech. Syst. Signal Process.* – 2017. – Vol. 86. – P. 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.038>
162. Arbel D., Eyal A. Dynamic optical frequency domain reflectometry // *Opt. Express*. – 2014. – Vol. 22. – № 8. – P. 8823. <https://doi.org/10.1364/OE.22.008823>
163. Kreger S.T., Klein J.W., Rahim N.A.A., Bos J.J. Distributed Rayleigh scatter dynamic strain sensing above the scan rate with optical frequency domain reflectometry // *Fiber Optic Sensors and Applications XII* / ed. Pickrell G., Udd E., Du H.H. – Bellingham, WA: SPIE, 2015. – Vol. 9480. – P. 948006. <https://doi.org/10.1117/12.2177578>
164. Wada D., Igawa H., Kasai T. Vibration monitoring of a helicopter blade model using the optical fiber distributed strain sensing technique // *Appl. Opt.* – 2016. – Vol. 55. – № 25. – P. 6953. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006953>
165. Heaney P.S., Ivanco T.G., Bilgen O. Distributed Sensing of a Cantilever Beam and Plate using a Fiber Optic Sensing System // 2018 Applied Aerodynamics Conference. – Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3482>
166. Li Y., Pan Y., Sharif-Khodaei Z. Real-time deformation digital twin of composite plates via distributed fiber optic sensing // *Adv. Eng. Inform.* – 2026. – Vol. 69. – P. 103992. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103992>
167. Cazzulani G., Cinquemani S., Comolli L., Gardella A., Resta F. Vibration control of smart structures using an array of Fiber Bragg Grating sensors // *Mechatronics*. – 2014. – Vol. 24. – № 4. – P. 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.07.014>
168. Chen M. Distributed vibration sensor with a high strain dynamic range by harmonics analysis // *Opt. Laser Technol.* – 2023. – Vol. 159. – P. 109006. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.109006>
169. Kinet D., Mégret P., Goossen K.W., Qiu L., Heider D., Caucheteur C. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14. – № 4. – P. 7394–7419. <https://doi.org/10.3390/s140407394>
170. Murukeshan V.M., Chan P.Y., Ong L.S., Seah L.K. Cure monitoring of smart composites using Fiber Bragg Grating based embedded sensors // *Sens. Actuators Phys.* – 2000. – Vol. 79. – № 2. – P. 153–161. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00266-6](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00266-6)
171. Kang H.-K., Kang D.-H., Bang H.-J., Hong C.-S., Kim C.-G. Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors // *Smart Mater. Struct.* – 2002. – Vol. 11. – P. 279–287. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/311>
172. Montanini R., D'Acquisto L. Simultaneous measurement of temperature and strain in glass fiber/epoxy composites by embedded fiber optic sensors: I. Cure monitoring // *Smart Mater. Struct.* – 2007. – Vol. 16. – P. 1718–1726. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/026>
173. Tsai J.-T., Dustin J.S., Mansson J.-A. Cure strain monitoring in composite laminates with distributed optical sensor // *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* – 2019. – Vol. 125. – P. 105503. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105503>
174. Wang S., Lasn K., Elverum C.W., Wan D., Echtermeyer A. Novel in-situ residual strain measurements in additive manufacturing specimens by using the Optical Backscatter Reflectometry // *Addit. Manuf.* – 2020. – Vol. 32. – P. 101040. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101040>
175. Chen R., He W., Xie H., Liu S. Monitoring the strain and stress in FDM printed lamellae by using Fiber Bragg Grating sensors // *Polym. Test.* – 2021. – Vol. 93. – P. 106944. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106944>
176. Mashayekhi F., Bardon J., Koutsawa Y., Westermann S., Addiego F. Methods for embedding fiber Bragg grating sensors during material extrusion: Relationship between the interfacial bonding and strain transfer // *Addit. Manuf.* – 2023. – Vol. 68. – P. 103497. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103497>

Благодарности:

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Для цитирования:

Матвеев В.П., Сероваев Г.С. Измерение деформаций волоконно-оптическими датчиками. Обзор // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 5–32. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.1>

Сведения об авторах:

Матвеев Валерий Павлович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; научный руководитель Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ПФИЦ УрО РАН»), 614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13А; e-mail: mvp@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-2787-6558

Сероваев Григорий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: serovaev@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-0312-8088

STRAIN MEASUREMENT USING FIBER-OPTIC SENSORS: A REVIEW

Matveenko V.P., Serovaev G.S.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

The paper presents a review of research related to strain measurement using fiber-optic sensors (FOS). Single-point FOS based on fiber Bragg gratings and distributed FOS based on Rayleigh scattering are considered. A brief history of FOS development is presented, along with an overview of basic operating principles of point and distributed sensors. Applications of FOS in aircraft structures, geotechnical monitoring, civil infrastructure, medicine, and biomechanics are discussed. Particular attention is paid to factors that determine the reliability of strain values measured by point and distributed FOS: strain transfer from the measured object to the optical fiber region where measurements are performed; changes in the structure and stress-strain state of the material after FOS embedding; accounting for the complex stress state in the optical fiber when calculating strain from physical quantities recorded by the sensor; the influence of temperature and humidity; and the influence of strain gradients. The paper also analyzes the use of FOS embedded in materials to measure process-induced and residual strains in polymer and composite materials manufactured via various chemical molding and additive manufacturing technologies. It is shown that correct interpretation of sensor readings requires consideration of the physical principles of measurement, bonding or embedding conditions, material properties, and data processing algorithms. Promising areas for the application of FOS are considered.

Keywords: *strain measurement, fiber-optic sensors, fiber Bragg grating, optical frequency domain reflectometry, point sensors, distributed sensors, polymer composite material*

Поступила в редакцию: 13.07.2026

Принята к публикации: 21.07.2026

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ УСТОЙЧИВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОДНЫХ МАСС

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

Лепихин А.П., *Горный институт УрО РАН, Пермь*

Паршакова Я.Н., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Богомолов А.В., *Горный институт УрО РАН, Пермь*

Гидротехническое регулирование основывается на оперативном управлении уровнями и расходами. Базовым, но далеко не совершенным вариантом таких действий выступает технология форсированной промывки водоема, приуроченная к пику естественного притока – весеннему половодью. Классический подход здесь предполагает заблаговременное понижение уровня воды до минимально допустимой отметки (уровня мертвого объема) с последующим пропуском паводковых вод через водосливной фронт. Теоретически такой механизм должен обеспечивать вынос загрязнённых вод из придонных горизонтов. Однако на практике для условий Верхне-Зырянского гидроузла результативность данной методики резко снижается из-за конструктивных особенностей водосбросного тракта. Сооружение оснащено шахтным водосливом, порог которого расположен на отметке, близкой к нормальному подпорному уровню (НПУ). Как было установлено ранее, в условиях устойчивой плотностной стратификации наиболее минерализованные слои локализуются в придонной толще. При существующей конструкции водосброса промываются водные массы, формирующиеся на поверхностном и промежуточном горизонтах. При прохождении паводка в нижний бьеф сбрасываются наиболее пресные воды нормативного качества, тогда как глубинные высокоминерализованные воды, представляющие наибольшую опасность для обеспечения устойчивого технического водоснабжения, остаются гидравлически запертыми в понижениях рельефа дна и продолжают аккумулироваться. Традиционный вариант промывки приводит к неэффективному расходованию паводкового потенциала, поскольку не дает эффекта снижения общей минерализации забираемой воды. Принципиально иным подходом к решению задачи, позволяющим устранить указанные конструктивные недостатки, служит парадигма селективного (избирательного) водоотведения. Наиболее перспективной и технологически обоснованной реализацией данной концепции выступает создание специализированного паводкового водосброса сифонного типа, ориентированного на отведение высокоминерализованных вод из самых глубоких зон водохранилища. В рамках настоящей работы построена численная модель и проведена серия вычислительных экспериментов, направленная на детализацию инженерных решений обеспечения устойчивого технического водообеспечения в условиях значительной стратификации водных масс.

Ключевые слова: водные объекты, моделирование качества воды, вертикальная стратификация водных масс, селективный водосброс

Введение

Регулирование режима водных объектов как инструмент управления водными ресурсами является общепринятой мировой практикой [1, 2]. Ключевым параметром, определяющим гидрологический режим и качество воды в таких системах, выступает пуск из водохранилища. От него зависит не только выработка гидроэлектроэнергии

и поддержание уровней в периоды половодья и паводков, но и процессы санации водных масс. При этом для отдельных участков водохранилищ характерно проявление стратификационных эффектов. Они обусловлены неоднородностью полей температуры и минерализации воды, формируемых в водохранилищах.

Изучению плотностных течений посвящено большое количество натурных наблюдений, лабораторных опытов и вычислительных экспериментов [3-9]. Экспериментальные изыскания, дополняющие теоретическую базу, представлены в трудах [10-12]. На начальном этапе модельные исследования концентрировались на наклонных каналах простой прямоугольной формы. Стремясь заложить основы для понимания сложных процессов, авторы первых аналитических моделей нередко прибегали к ряду упрощающих допущений [13-16].

На современном этапе фокус внимания сместился в сторону моделирования плотностных течений, воспроизводящих реальную геометрию водотоков и акваторий [17, 18].

Исследования последних лет подчеркивают многообразие факторов, инициирующих плотностную стратификацию. Так, в работе [19] продемонстрировано, что в условиях поступления в водохранилище сразу нескольких рек плотностные течения формируются за счет разницы не только температур, но и химического состава вод. Холодные притоки формируют придонные шлейфы, тогда как теплые воды растекаются в поверхностном слое, а на участках встречи течений возникают застойные зоны, создающие благоприятные условия для эвтрофикации. Механизм формирования крупномасштабных солевых вихрей при слиянии потоков с разной минерализацией детально раскрыт в исследовании [20]. Классические работы [21] и [22] остаются важными для понимания гидродинамики стратифицированных водохранилищ и теории селективного отбора.

Контроль качества воды в водоемах со стратификацией обычно достигается за счет избирательного отбора воды из определенных горизонтов либо посредством управления режимом сброса, позволяющим минимизировать негативные последствия стратификации. Селективный водозабор характеризуется отводом воды из определенной толщины вблизи водозабора. Значительное число современных исследований посвящено оптимизации систем селективного водозабора с использованием гидродинамических моделей разной размерности.

В качестве наглядного примера в настоящей статье рассматривается система технического водоснабжения промышленного предприятия, забирающего воду из Верхне-Зырянского водохранилища. Проведенные полевые исследования (включая батиметрическую и кондуктометрическую съемку) выявили значительную вертикальную неоднородность водных масс, которая на практике выражалась в существенных сезонных колебаниях солесодержания на водозаборе. Для оценки масштабов и устойчивости этой стратификации при разных гидрологических режимах и была разработана гидродинамическая модель.

Объект исследования

Для целей обеспечения устойчивого водоснабжения отдельных предприятий создаются небольшие водохранилища. Одним из таких водоемов является Верхне-Зырянское водохранилище. Оно расположено в 3,5 км юго-восточнее города Березники.

Водохранилище построено и введено в постоянную эксплуатацию в 1969 году. Помимо промышленного водоснабжения, водоем имеет еще рекреационное значение для местного населения.

Бассейн реки Зырянка расположен в северной части бассейна реки Камы. Реки рассматриваемой территории относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. В питании рек преимущественное значение имеют снеговые воды. Весеннее половодье на водотоке начинается в середине апреля, заканчивается к концу мая – началу июня. Продолжительность половодья составляет до 40 суток. Летне-осенняя межень устанавливается к середине июня и длится до конца октября. Устойчивый ледостав устанавливается в ноябре и длится до середины апреля.

Правилами использования водных ресурсов Верхне-Зырянского водохранилища, утвержденными Приказом Федерального агентства водных ресурсов от 29 ноября 2023 года № 288 [2] установлены нормативные уровни воды водоема: нормальный подпорный уровень (НПУ) и уровень мертвого объема (УМО). Они соответственно составляют: НПУ – 124,0 м БС, УМО – 121, 0 м БС. Полная статическая емкость водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ) составляет 12,8 млн м³, тогда как емкость при уровне мертвого объема (УМО) равна 3,73 млн м³. Соответственно, полезный объем водохранилища, определяемый как разность между полным и мертвым объемами, при НПУ не превышает 9,1 млн м³. Ширина водохранилища в приплотинной части достигает 870 м, при этом максимальные глубины, составляющие 10–11 м, приурочены к участкам затопленного русла. Средняя глубина водохранилища не превышает 3,7 м, что можно видеть из Рисунка 1, на котором представлено распределение глубин по акватории Верхне-Зырянского водохранилища по данным батиметрической съемки «ГИ УрО РАН» 2025 года. Площадь зеркала водоема изменяется от 3,49 до 2,41 км².

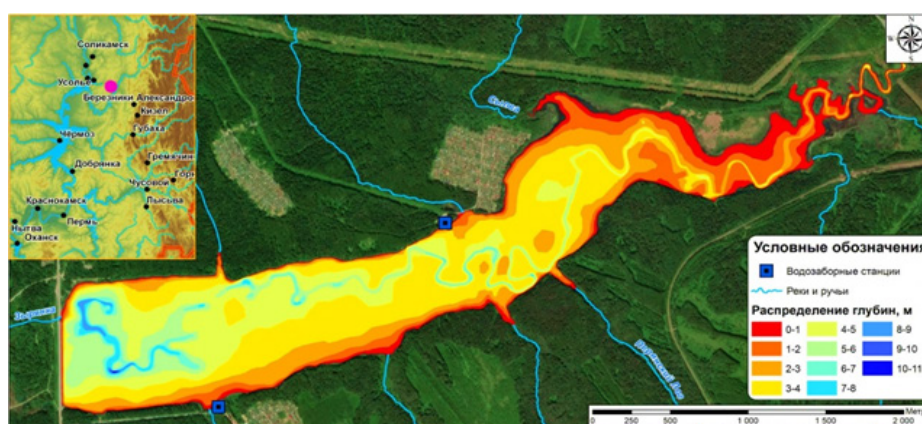


Рис. 1. Распределение глубин по акватории Верхне-Зырянского водохранилища в соответствии с данными батиметрической съемки «ГИ УрО РАН»

В естественных условиях гидрохимический облик рек исследуемой территории преимущественно определяется гидрокарбонатно-кальциевыми и гидрокарбонатно-сульфатными фациями, что обусловлено природными геохимическими особенностями региона. Предуралья с минерализацией 200 – 500 мг/дм³. При этом для вод рассматриваемого водного объекта характерна существенная внутригодовая

изменчивость качества воды. Наиболее высокие концентрации макрокомпонентов солевого состава в водохранилище отмечаются в период зимней межени (ледостава), когда основное питание водного объекта происходит за счет подземных вод.

Методы и материалы натурного исследования

В рамках проведенного исследования оценивалась пространственная, в том числе вертикальная, неоднородность водных масс. Было проведено несколько серий полевых работ в периоды зимней и летней межени.

Исследование вертикальной неоднородности водных масс наиболее удобно проводить с использованием показателя «удельной электропроводности воды», измеряемой, как правило, в [мкСм/см]. В общем случае величина удельной электропроводности воды определяется составом растворенных ионов, их концентрацией, а также температурой воды. Природные воды представляют в основном растворы смесей сильных электролитов. Минеральную часть воды составляют ионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . В связи с этим, для оперативного контроля состояния водных масс широкое применение получил показатель удельной электропроводности. Это связано с наличием практически линейной зависимости между содержанием ионов и удельной электропроводностью. Современные приборы для измерения электропроводности автоматически производят поправку на температуру воды, а измеряемые значения приводят к условной температуре $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$. Связь между общей минерализацией воды и удельной электропроводностью определяется стабильностью химического состава.

Исследование проводилось на протяжении пяти лет: 2020-2024 гг. Результаты исследований позволили получить целостную картину изменения удельной электропроводности в исследуемых створах Верхне-Зырянского водохранилища и выявить слои с повышенной минерализацией воды. На рисунках 2 и 3 представлены графики, иллюстрирующие изменение удельной электропроводности воды по глубине для двух участков водопользования (забора воды).

Как видно из рисунков, обнаружено наличие в придонных слоях зон с повышенной по сравнению с поверхностным слоем минерализацией, данная вертикальная стратификация отмечается как в период летней межени, так и в период зимней межени. Максимальные значения минерализации вблизи дна, достигающие 10-кратного увеличения, наблюдаются в период зимней межени. Интенсивный рост минерализации отмечается ниже отметки УМО водохранилища (121 м БС). Слой скачка электропроводности располагается на отметках 117,5-119,0 м БС. Максимальные величины удельной электропроводности были зафиксированы в марте 2020 и марте 2021 годов и достигали 10000 мкСм/см.

На рисунке 4 представлен поперечный профиль водохранилища, на котором также отчетливо видно изменение качества воды с глубиной: в глубоких зонах, приуроченных к участкам старого русла, наблюдается существенное увеличение удельной электропроводности, а значит и общей минерализации воды. Местоположение контрольной линии данного поперечного профиля отображено на рисунке 1.

Водозаборные оголовки на исследуемом водоеме располагаются в придонной области, что, с одной стороны, определяется необходимостью гарантированного обеспечения предприятия водой даже в условиях маловодных периодов, с другой стороны, тем, что в летний период дополнительным лимитирующим показателем качества воды становится температура, которая в поверхностных слоях на 15-20 $^\circ\text{C}$ выше придонной.

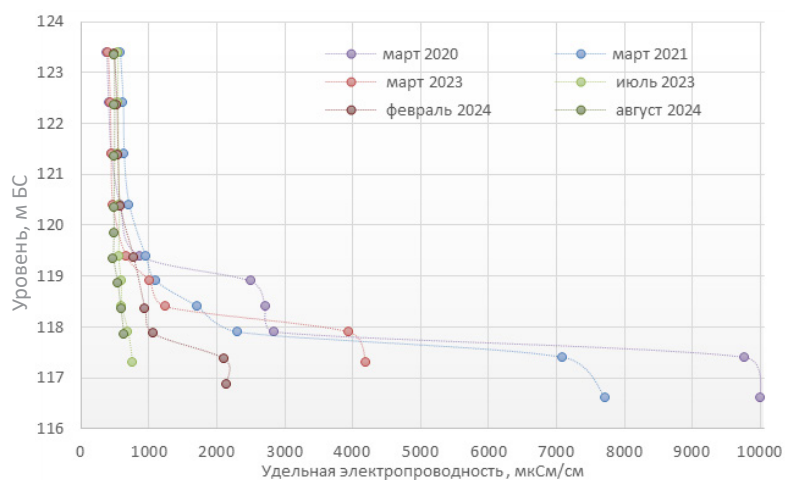


Рис. 2. Распределение величины удельной электропроводности воды за период 2020-2024 гг. для вертикали у водозабора № 1

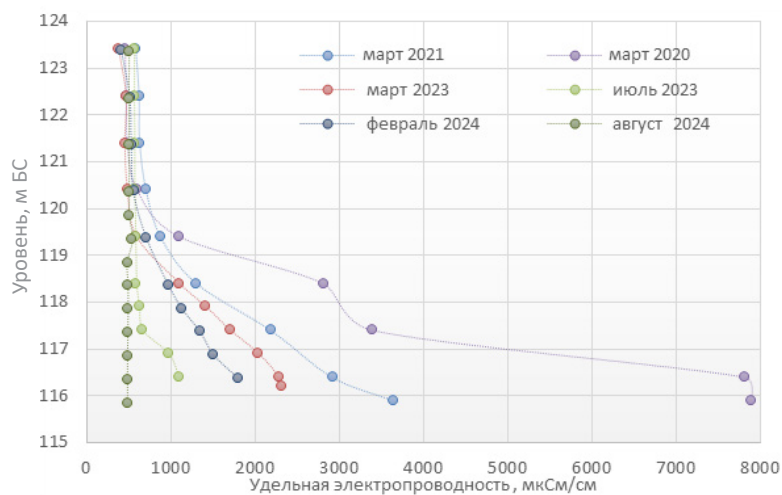


Рис. 3. Распределение величины удельной электропроводности воды за период 2020-2024 гг. для вертикали у водозабора № 2

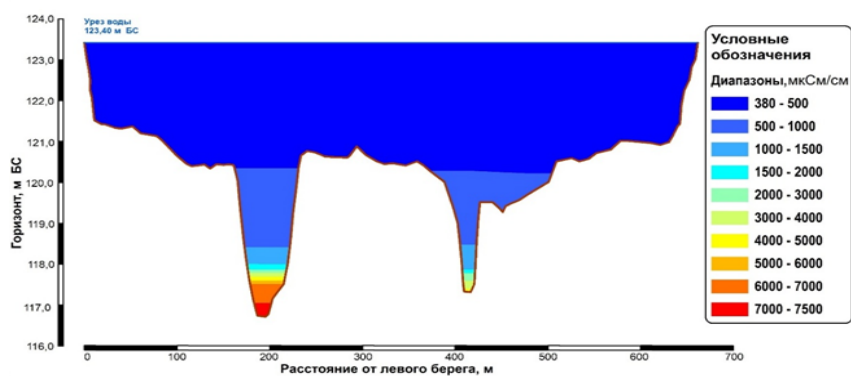


Рис. 4. Изменение величины удельной электропроводности в поперечном сечении Верхне-Зырянского водохранилища в марте 2023 г.

Формирование таких выраженных стратификационных эффектов обусловлено значительными различиями плотностей водных масс на разных глубинах. Плотность водных масс зависит от температуры, минерализации и давления. Качество воды определяется также содержанием взвешенных наносов. Роль давления становится заметной лишь на очень значительных глубинах. Для исследуемого водного объекта, максимальные глубины которого не превышают 12 м, данным фактором можно пренебречь ввиду его незначительности. Поскольку в весовом соотношении содержание взвешенных наносов в данном водном объекте значительно меньше минерализации воды, их ролью в формировании плотности водных масс также можно пренебречь. Таким образом, для исследуемого водоема основными детерминантами плотности выступают температура и минерализация воды [1, 2]. Поскольку природа этих двух факторов принципиально различна, в прикладных исследованиях часто выделяют доминирующий. Тем не менее, в водоемах, испытывающих сильное техногенное воздействие, необходимо комплексно учитывать оба параметра. Такой подход позволяет обнаруживать новые явления и по-новому интерпретировать уже известные процессы.

Решение этой задачи осложняется нелинейной зависимостью плотности от температуры. Дело в том, что пресная вода имеет максимальную плотность при 4°C, а с ростом минерализации эта температура меняется. Совместное влияние температуры и солености значительно увеличивает количество возможных сценариев формирования плотности. Эти факторы могут как усиливать, так и компенсировать друг друга, что приводит к большому разнообразию вертикальных профилей распределения параметров по глубине.

Поскольку скорость течения в этих водоемах низка ($V \leq 0,05$ м/с), даже незначительные градиенты плотности способствуют формированию устойчивых стратифицированных структур. Эти структуры оказывают решающее влияние на процессы формирования качества воды и определяют стабильность всей системы водопользования.

Предлагаемые мероприятия по улучшению гидрохимического режима водохранилища

Мероприятия, которые могут улучшить гидрохимический режим водохранилища, могут быть диверсифицированы по принципу воздействия и локализации на две основные группы:

1. Активные (оперативные) мероприятия. Направлены на прямое воздействие на водную массу в самом водохранилище с целью разового или периодического снижения концентрации растворенных веществ. Их сущность заключается в искусственной интенсификации водообмена и направленном удалении наиболее минерализованных слоев воды.

2. Пассивные (предупредительные) мероприятия. Направлены на минимизацию притока солей в водоем с площади водосбора. Включают в себя выявление и ликвидацию (или изоляцию) точечных и рассредоточенных источников загрязнения, организацию водоохраных зон, лесомелиорацию и т.д.

Применительно к Верхне-Зырянскому водохранилищу внедрение пассивных мер наталкивается на трудности принципиального характера. Поступление высокоминерализованных рассолов происходит не из локализованного точечного

источника, а в виде рассредоточенных выходов подземных вод или диффузного стока с засоленных территорий. Это делает процессы их идентификации и технологического подавления крайне сложными и дорогостоящими.

Таким образом, фокус практического внедрения смещается в сторону активных инженерных решений, реализуемых через модификацию режимов работы гидротехнического узла. Базовым активным мероприятием является промывка водохранилища в период прохождения максимального естественного стока – весеннего половодья. Традиционная методика предполагает предпаводковую сработку водохранилища до отметки «мертвого» объема с последующим пропуском паводковых вод через водосливные сооружения. Данный механизм должен приводить к разбавлению высокоминерализованных вод и транспортировке их в сторону нижнего бьефа. Однако эффективность данной методики для Верхне-Зырянского водохранилища существенно ограничена конструктивными особенностями водосбросного узла: водохранилище имеет водосброс шахтного типа автоматического действия, при котором гребень водослива располагается на отметке, близкой к НПУ. Как уже отмечалось выше, в условиях устойчивой плотностной стратификации наиболее минерализованные воды аккумулируются в придонном горизонте. При данном типе водосброса в нижний бьеф отводятся водные массы из верхних, средних слоев, т.е. в период паводка через него проходит преимущественно свежая, слабоминерализованная вода. Придонные рассолы при этом остаются в изолированном состоянии и продолжают накапливаться. Таким образом, традиционная промывка без селекции по глубине приводит к нерациональному использованию паводкового ресурса и не решает проблему кардинально, обеспечивая лишь временную и незначительную стабилизацию общего солесодержания.

Качественным технологическим скачком, позволяющим преодолеть описанные ограничения, является концепция организации селективного водосброса, обеспечивающего принудительный забор воды из придонной области водохранилища. Наиболее эффективной инженерной реализацией данной концепции является создание специализированного паводочного донного водосброса.

При проектировании водозаборная часть (входное оголовье) размещается в придонной зоне, в области максимальной концентрации солей. В период половодья данная система способна обеспечить забор высокоминерализованной воды с последующим ее сбросом в нижний бьеф. Это позволяет целенаправленно и с высокой эффективностью эвакуировать «рассольную подушку», что приводит к значительному снижению общей минерализации водохранилища и предотвращению конвективного перемешивания солей.

Важным инженерным аспектом является то, что организация подобной конструкции требует реконструкции существующего водослива. Это сопряжено с существенными капитальными вложениями, необходимостью временного изменения режима эксплуатации водохранилища и проведением комплексных изысканий. Для оценки эффективности данного мероприятия в рамках исследования предложен инструмент численного гидродинамического моделирования.

Численное моделирование в рамках предлагаемых мероприятий по улучшению гидрохимического режима водохранилища

Для рассмотрения влияния способа пропуска воды через плотину на положение слоя скачка минерализации по глубине проводилось трехмерное численное моделирование.

Рассматривалась модельная задача для реальной геометрии исследуемого объекта. Для построения расчетной сетки область моделирования, показанная на рисунке 5, по акватории разбивалась на четырехугольные ячейки с линейным размером 20 м. По глубине расчетная сетка строилась со сгущением ко дну водохранилища, максимальный размер составлял 0,3 метра, минимальный – 0,02 м, при этом число узлов по вертикали составляло 80. Общее число узлов расчетной сетки – 670000 узлов.

В начальный момент времени распределение концентрации по глубине считалось неравномерным:

$$C(z) = \begin{cases} 0.3 \text{ г/л, } z > 4, \\ 3.0 \text{ г/л, } z \leq 4. \end{cases} \quad (1)$$

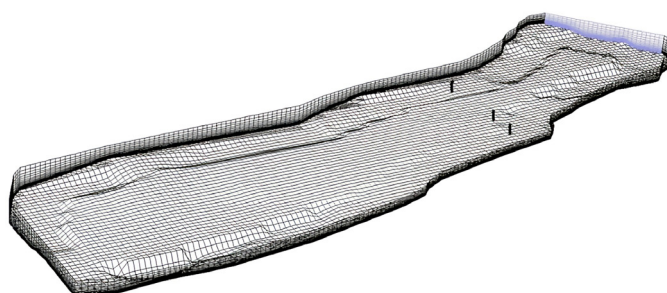


Рис. 5. Расчетная сетка участка моделирования Верхне-Зырянского водохранилища в трехмерной постановке. Длина участка 3 км

На рисунке 6 показано начальное распределение концентрации примеси в расчетной области. В первом варианте из выпускного устройства плотины при помощи поднятия шандор, нижняя часть которых расположена на глубине 4 метра от поверхности, с постоянной скоростью $\vec{v}$ вытекает вода. Во втором случае шандор поднят наверх на 4 м таким образом, что вода вытекает вблизи дна, глубинный водосброс. На входе расчетной области задается постоянный поток со скоростью $\vec{U}$, концентрация задается в виде скачка. Температура полагалась постоянной и равной значению на дне чаши: $T = 7^\circ\text{C}$.

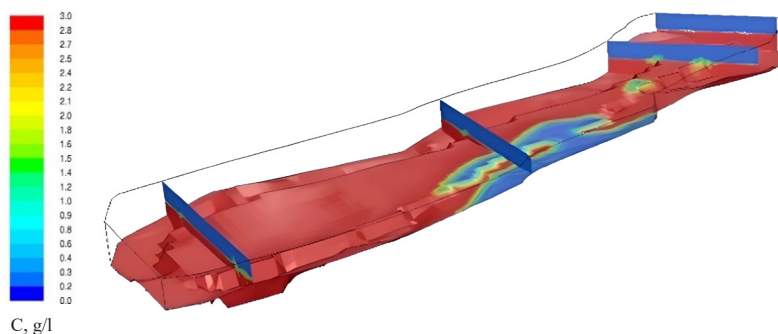


Рис. 6. Начальное распределение минерализации в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях

Математическая модель

Для вычислений применялся метод конечных объемов. Расчеты проводились в рамках нестационарной неизотермической задачи до получения стационарного решения с относительной точностью 3.5×10^{-4} . Турбулентные пульсации описывались с помощью $(k-\varepsilon)$ -модели как наименее ресурсо- и времязатратной. Параметризация плотности воды в зависимости от минерализации и температуры производилась на основе уравнения состояния в виде степенной функции:

где

$$\rho = \rho_0 + A_c c + B_c c^{1.5} + D_c c^2,$$

$$\rho_0 = 999.843 + 0.067939 T - 0.009095 T^2 + 0.000169 T^3,$$

$$A_c = 0.824 - 0.004090 T + 0.000076 T^2,$$

$$B_c = -0.005726 + 0.000102 T, \quad C_c = 0.000483.$$

Перепад плотности по глубине достигал 10%.

Уравнение баланса массы и импульса имело вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right] + \rho g_i.$$

Уравнения (2) и (3) содержат следующие обозначения: ρ – плотность жидкости; v_i – компоненты скорости в декартовых координатах ($i = x, y, z$), при этом z – вертикальная координата, x и y – горизонтальные координаты, основной поток направлен вдоль x -координаты; μ – кинематическая вязкость жидкости; δ_{ij} – символ Кронекера. Турбулентная вязкость μ_t является функцией турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε : $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, где C_μ – константа.

Уравнения для нахождения турбулентной энергии и скорости ее диссипации записывались в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) имеют место следующие обозначения: $G_k = \mu_t S^2$ – генерация турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости; $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ – норма тензора средней скорости деформации потока, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$; Pr_t – турбулентное число Прандтля; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε – константы.

В уравнение для турбулентной кинетической энергии вводит член $G_b = -\frac{g_j (\mu_t / \rho)}{Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$, описывающий генерацию турбулентной энергии за счет сил плавучести в поле силы тяжести. Поскольку вектор ускорения свободного падения $\mathbf{g}$ направлен вертикально вниз, в случае устойчивой плотностной стратификации ($\partial \rho / \partial x_3 < 0$) вышеуказанный член является отрицательным, что означает уменьшение турбулентной кинетической энергии при действии сил плавучести.

Применимость (k - ε)-модели турбулентности была проверена тестовыми расчетами с использованием модели более высокого порядка – модели Рейнольдса, в которой решаются семь дополнительных уравнений для напряжений Рейнольдса. Обнаружено, что для различных сеток отличие в полученных данных составляет менее 5% для интегральных значений компонент скорости в различных сечениях.

Уравнение переноса примеси записывалось в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} c) = -\nabla \cdot \mathbf{J}. \quad (6)$$

В уравнении (6) содержатся следующие обозначения: ∇ – оператор набла; $\mathbf{J}$ – вектор диффузионного потока примеси, определяемый выражением

$$\mathbf{J} = -\rho(D_m + D_t)\nabla c. \quad (7)$$

Здесь D_m – коэффициент молекулярной диффузии; D_t – эффективный коэффициент турбулентной диффузии, связанный с турбулентной вязкостью μ_t соотношением $D_t = (\mu_t/\rho)/Sc_t$, где Sc_t – турбулентное число Шмита.

Турбулентный перенос тепла представлялся с использованием модели Рейнольдса аналогично турбулентному переносу импульса. Уравнение для энергии имело следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i \rho C_p T] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right), \quad (8)$$

где C_p – удельная теплоемкость, κ_{eff} – эффективная теплопроводность, $(\tau_{ij})_{eff}$ – девиатор тензора напряжений

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (9)$$

при этом $\mu_{eff} = \kappa_{eff} Pr/C_p$ – эффективная вязкость, определяемая через эффективную теплопроводность: $\kappa_{eff} = \kappa + C_p \mu_t / Pr_t$, где κ – коэффициент теплопроводности.

Граничные условия, при которых решалась задача (1)–(9), приведены ниже для разных границ системы:

– на дне и берегах чаши, то есть на жестких границах, предполагалось выполнение условий прилипания и нулевого потока массы:

$$v_x = v_y = v_z = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad T = T_0; \quad (10)$$

– на входе в расчетную область задавалась скорость основного потока (вектор скорости потока окружающей среды перпендикулярен входной границе $\mathbf{U} = \{U, 0, 0\}$); концентрация устанавливалась равной фоновой концентрации загрязняющего вещества в воде:

$$v_x = U, \quad v_y = 0, \quad v_z = 0, \quad c = c_0, \quad T = T_0 + z(T_a - T_0)/H; \quad (11)$$

– верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, полагалась недеформируемой; на ней считались отсутствующими нормальная компонента скорости жидкости, касательные напряжения и поток примеси:

$$(\mathbf{v} \mathbf{n}) = 0, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_x} = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_y} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad \kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_e), \quad (12)$$

где h – коэффициент теплообмена, T_e – температура воздуха;

– на поверхности воды задавался линейный закон теплоотдачи, учитывающий нагрев поверхности от окружающего воздуха; коэффициент теплообмена выбирался на основании данных полевых измерений и составлял $100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

– на выходе из расчетной области требовалось выполнение условия баланса массы:

$$\oint_{S_{in}} \rho v_{in} dS - \oint_{S_{out}} \rho v_{out} dS = 0. \quad (13)$$

Используемые при решении задачи (1)–(9) эмпирические константы и их значения брались из работы [9]: $Pr_t = 0.85$, $Sc_t = 0.7$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$. Кинематическая вязкость принималась равной $\mu = 9.34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент молекулярной диффузии составлял $D = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Для коэффициента шероховатости дна реки взято значение 0.035, которое соответствует однородной поверхности песчаных зерен и их диаметру 0.001 м. При получении дискретных аналогов разрешающих уравнений применялись конечные объемы с «привязкой» переменных к центрам граней. При выполнении пространственной дискретизации уравнений схема имела второй порядок точности. Временная эволюция моделировалась на основе явной схемы второго порядка аппроксимации.

Численное моделирование осуществлялось с использованием программного пакета ANSYS Fluent на вычислительном кластере URAN Института математики и механики им. Н.Н. Красовского (ИММ УрО РАН, Екатеринбург, Россия).

Временной шаг $\Delta t = 0.5 \text{ с}$ задавался с автоматическим дроблением при нарушении критерия Куранта–Фридрихса–Леви. Использовалось количество итераций на временном слое: до 20 итераций метода SIMPLE (или явного прогноза-коррекции) для уравнений движения. Обработка сетки вблизи дна проводилась с использованием пристеночных функций с $y^+ \approx 30$ и сгущением сетки (первый узел на расстоянии 0.05 м от дна).

Результаты численного моделирования

Рассматривались два сценария пропуска воды: поверхностный и придонный. В поверхностном пропуске водопропускное устройство опускается так, что вода истекает от участка, расположенного на 1 метр от свободной поверхности. При глубинном пропуске вода вытекает снизу на расстоянии 1 м от дна. Расход сброса воды соответствует среднемесячному расходу за май месяц, когда проходит весенний паводок – $8,5 \text{ м}^3/\text{сек}$.

В результате численных экспериментов найдено, что при пропуске весеннего паводка в случае сброса воды вблизи поверхности происходит определенная промывка водохранилища, однако расположение слоя плотностного скачка снижается незначительно. Это можно видеть на рисунке 7, на котором показано поле температуры и поле минерализации воды на расчетном участке Верхне-Зырянского водохранилища. Расчет проводился для 10 дней. Неоднородность температуры (Рис. 7(а)) способствует устойчивости слоя скачка. Более минерализованная вода расположена у придонных горизонтов (Рис. 7(а)). А значит, в оголовок водозабора будет поступать вода с низкой минерализацией лишь при расположении оголовка на расстоянии выше трех метров от дна.

В случае донного водовыпуска для ГТС Верхне-Зырянского водохранилища на протяжении пяти суток происходит практически полная промывка водохранилища, что можно видеть на рисунке 8. Снижение концентрации примеси на дне в два раза наблюдается в первые сутки. За пять суток минерализация снижается на порядок и распределение примеси становится практически однородным.

Обсуждение результатов

Проблема устойчивого роста уровня минерализации водной массы Верхне-Зырянского водохранилища выходит за рамки локального гидрохимического дисбаланса и представляет собой системный вызов для обеспечения надежности технического водоснабжения промышленных предприятий. Решение данной задачи

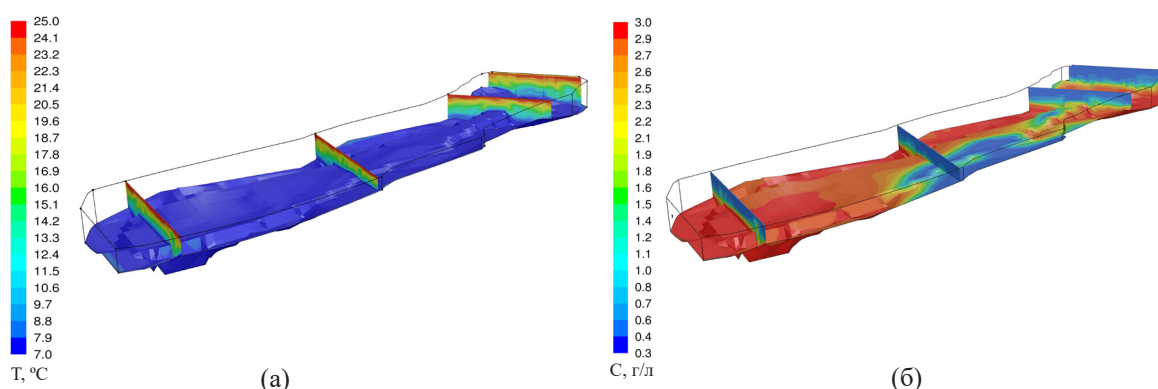


Рис. 7. Распределения температуры (а) и минерализации (б) в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях в случае приповерхностного сброса воды из водохранилища

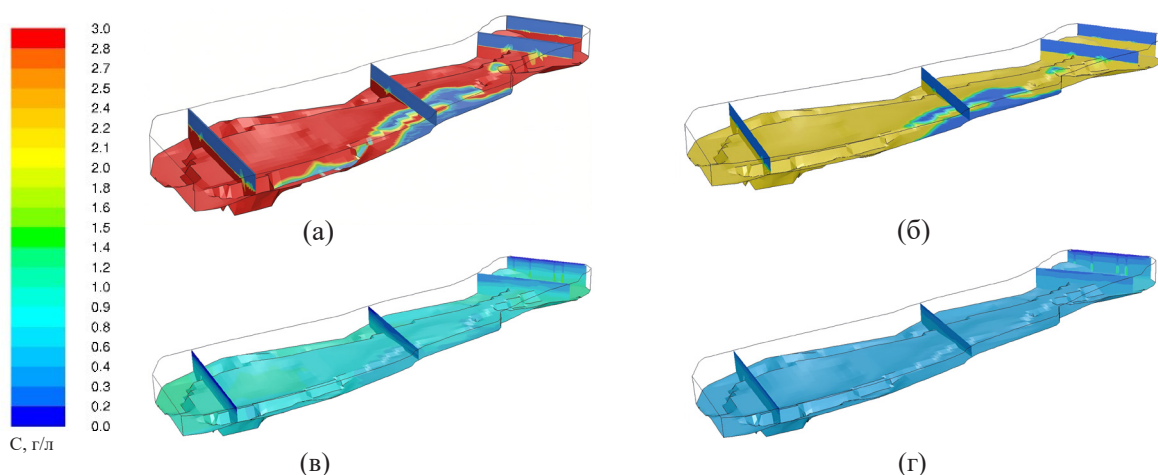


Рис. 8. Распределения минерализации в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях в случае заглубленного сброса воды из водохранилища после: расчетное время (а) – 5 минут, (б) – 12 часов, (в) – двое суток, (г) – пять суток

не может быть сведено к единичному мероприятию, а требует разработки многоуровневой стратегии, интегрирующей природоохранные, гидротехнические и эксплуатационные меры. Проведенный комплексный анализ позволяет однозначно дифференцировать доступные инструменты воздействия на солевой режим по степени их эффективности, оперативности и ресурсоемкости.

В первую очередь, следует системно оценивать потенциал пассивных (организационно-мелиоративных) мероприятий, реализуемых непосредственно на площади водосбора. Несмотря на их несомненную стратегическую значимость, с точки зрения долгосрочного оздоровления экосистемы и снижения антропогенной нагрузки на притоки, их практическая применимость в текущей гидрологической ситуации сталкивается с серьезными ограничениями. Во-первых, внедрение почвозащитных технологий, лесоразведение и регулирование стока с сельхозугодий являются чрезвычайно капиталоемкими проектами с длительным лаг-периодом, измеряемым десятилетиями. Во-вторых, эффект от них носит вероятностный характер и сильно зависит от метеоусловий, что не позволяет гарантировать необходимого

снижения минерализации в критический для водопользования период. Таким образом, пассивные меры не могут рассматриваться в качестве инструмента оперативного купирования уже сформировавшегося очага засоления в придонной области водохранилища.

В противовес этому, активные технологические методы воздействия на внутриводоемные процессы демонстрируют способность обеспечить управляемый и быстрый эффект. В ходе исследований установлено, что наиболее радикальным и физически обоснованным способом борьбы с накоплением рассолов является организация селективного паводкового донного водосброса. Физический принцип данного метода заключается в использовании естественной стратификации водной толщи: более тяжелые и холодные высокоминерализованные слои воды локализуются у дна, и их целенаправленное удаление через нижние водопропускные отверстия позволяет эвакуировать основной объем солей без потери наиболее ценного поверхностного слоя пресной воды. Однако столь высокая технологическая эффективность сопряжена с существенными инженерно-строительными ограничениями. Практическая реализация селективного сброса невозможна без коренной реконструкции существующего гидротехнического узла, включая модернизацию затворных систем, оборудование глубинных водоприемников и переустройство нижнего бьефа, что требует тщательного технико-экономического обоснования и остановки водохранилища на период работ.

Критически важным этапом обоснования предложенных решений стало трехмерное численное моделирование гидродинамических и массопереносных процессов, которое подтвердило не только теоретическую состоятельность, но и высокую практическую эффективность донного водосброса. Согласно расчетным сценариям, инициирование селективного сброса с расходом, обеспечивающим радикальное обновление придонных слоев, приводит к стремительной перестройке поля концентраций. Уже в течение первых суток после начала операции фиксируется двукратное снижение содержания солей в придонном горизонте, что свидетельствует об активном вовлечении в удаление наиболее минерализованных вод. При сохранении режима форсированного водообмена на протяжении пяти суток моделируется снижение концентрации примеси на порядок (в десять раз) по сравнению с исходным фоном. Такой результат демонстрирует, что предлагаемый метод позволяет за короткий промежуток времени (в рамках одной паводковой волны) кардинально оздоровить придонную зону, предотвращая дальнейшее накопление токсичных солей и замедляя процессы вторичного загрязнения водной толщи.

Наряду с очисткой водохранилища, не менее остро стоит вопрос обеспечения нормативных показателей качества воды, подаваемой на технические нужды промышленных предприятий. Поскольку даже после частичного сброса рассолов градиент минерализации по глубине сохраняется, критически важным становится правильный выбор горизонта водозабора. Моделирование отчетливо показывает, что в активно промываемом слое, расположенном выше отметки порога водосброса, устойчивого роста минерализации не наблюдается; этот горизонт характеризуется постоянным водообменом и разбавлением за счет паводковых вод. Следовательно, для обеспечения нормативного сохранения качества забираемой на технические цели воды необходимо организовать ее забор именно из этой верхней части водной толщи, минуя высокоминерализованные нижние слои.

Заключение

Обобщая полученные данные, следует подчеркнуть, что долговременная устойчивость системы технического водоснабжения промышленных предприятий может быть гарантирована исключительно принципом селективного отбора воды. Достижение этого требования возможно по двум альтернативным, но взаимодополняющим направлениям: первое предполагает капитальное конструктивное изменение существующего водозаборного узла с обязательным повышением отметки расположения его оголовка выше уровня сезонного скачка плотности; второе – модификацию режима пропуска воды через гидроузел, позволяющую регулировать положение границы раздела слоев и смещать зону активного водообмена в сторону водоприемных отверстий. Выбор между этими вариантами определяется конкретными морфометрическими характеристиками водохранилища, доступным бюджетом реконструкции и требуемой производительностью системы. В совокупности предложенный комплекс мероприятий – от селективного сброса до точечной корректировки расположения оголовков водозабора – представляет собой научно обоснованный путь к достижению нормативных показателей качества воды в условиях возрастающих техногенных нагрузок.

Библиографический список

1. *Pisaturo G.R., Righetti M., Castellana C., Larcher M., Menapace A., Premstaller G.* A procedure for human safety assessment during hydropeaking events // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 661. – P. 294-305.
2. *Ji Z.G.* Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – P. 509-566.
3. *Hauenstein W., Dracos T.* Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes // *J. Hydraul. Res.* – 1984. – Vol. 22. – P. 157-179. – <https://doi.org/10.1080/00221688409499404>
4. *Alavian V.* Behavior of density currents on an incline // *J. Hydraul. Eng.* – 1986. – Vol. 112. – P. 27-42. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:1\(27\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:1(27))
5. *Alavian V., Ostrowski Jr. P.* Use of density current to modify thermal structure of TVA reservoirs // *J. Hydraul. Eng.* – 1992. – Vol. 118. – P. 688-706. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:5\(688\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:5(688))
6. *Chikita K.* The role of sediment-laden underflows in lake sedimentation: glacier-fed Peyto Lake, Canada // *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7, Geophys.* – 1992. – Vol. 9. – P. 211-224.
7. *Cortés A., Rueda F., Wells M.* Experimental observations of the splitting of a gravity current at a density step in a stratified water body // *J. Geophys. Res. Ocean.* – 2014. – Vol. 119. – P. 1038-1053.
8. *Wells M.G., Wettlaufer J.S.* The long-term circulation driven by density currents in a two-layer stratified basin // *J. Fluid Mech.* – 2007. – Vol. 572. – P. 37-58.
9. *Wells M.G., Nadarajah P.* The intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies // *J. Phys. Oceanogr.* – 2009. – Vol. 39. – P. 1935-1947.
10. *Hallworth M.A. et al.* Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents // *J. Fluid Mech.* – 1996. – Vol. 308. – P. 289-311.
11. *Dallimore C.J., Imberger J., Ishikawa T.* Entrainment and turbulence in saline underflow in Lake Ogawara // *J. Hydraul. Eng.* – 2001. – Vol. 127. – P. 937-948. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:11\(937\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(937))
12. *Amini Sola S., Naeeni S.T.O., Khavasi E., Faghihirad S.* Experimental study of venting efficiency of salinity current // *ISH J. Hydraul. Eng.* – 2023. – P. 1-9. – <https://doi.org/10.1080/09715010.2023.2180331>
13. *Kranenburg C.* Gravity current fronts advancing into horizontal ambient flow // *J. Hydraul. Eng.* – 1993. – Vol. 119. – P. 369-379. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:3\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:3(369))

14. *Fernandez R.L., Imberger J.* Relative buoyancy dominates thermal-like flow interaction along an incline // *J. Hydraul. Eng.* – 2008a. – Vol. 134. – P. 636-643. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(636\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(636))
15. *Fernandez R.L., Imberger J.* Time-varying underflow into a continuous stratification with bottom slope // *J. Hydraul. Eng.* – 2008b. – Vol. 134. – P. 1191-1198. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1191\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1191))
16. *Porcile G., Enrile F., Besio G., Bolla Pittaluga M.* Hydrostatic vs. non-hydrostatic modelling of density currents developing two dimensionally on steep and mild slopes // *Appl. Ocean Res.* – 2022. – Vol. 121. – 103085. – <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103085>
17. *Cheng Z., Constantinescu G.* Stratification effects on flow hydrodynamics and mixing at a confluence with a highly discordant bed and a relatively low velocity ratio // *Water Resour. Res.* – 2018. – Vol. 54. – P. 4537-4562. – <https://doi.org/10.1029/2017WR022292>
18. *Umar M., Rhoads B., Greenberg J.A.* Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences // *J. Hydrol.* – 2018. – Vol. 556. – P. 325-338. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.02>
19. *Ryu I., Yu S., Chung S.* Characterizing Density Flow Regimes of Three Rivers with Different Physicochemical Properties in a Run-Of-The-River Reservoir // *Water.* – 2020. – Vol. 12. – 717. – <https://doi.org/10.3390/w12030717>
20. *Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Konovalov V., Tiunov A.* Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // *J. Hydrol.* – 2014. – Vol. 508. – P. 328-342. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>
21. *Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Lyakhin Yu.S., Bogomolov S.V.* Studying the Formation Features and the Extent of Diffuse Pollution Formed by Large Industrial Complexes: Case Study of the Solikamsk–Berezniki Industrial Hub // *Water Resour.* – 2020. – Vol. 47. – P. 744-750. – <https://doi.org/10.31857/S0321059620050120>
22. *Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А.* Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124. – <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.1.9>

Благодарности:

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г.).

Для цитирования:

Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В. Гидродинамические аспекты инженерных решений устойчивого технического водопользования в условиях значительной стратификации водных масс // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* – 2026. – № 3. – С. 33–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.2>

Сведения об авторах:

Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: lyubimova@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-8212-2890

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: lepihin49@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9874-3424

Паршакова Янина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: parshakova@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-0234-3854

Богомолов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: whitewing85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0626-4069

COMPUTATIONAL HYDRODYNAMIC ASPECTS OF ENGINEERING SOLUTIONS ENSURING THE DETERMINATION OF TECHNICAL WATER USE UNDER CONDITIONS OF STABLE STRATIFICATION

Lyubimova T.P.¹, Lepikhin A.P.², Parshakova Ya.N.¹, Bogomolov A.V.²

¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm*

²*Mining Institute UB RAS, Perm*

Hydraulic regulation is based on the operational management of water levels and flows. A basic, though far from perfect, approach to such measures is the technology of forced reservoir flushing timed to coincide with the peak natural inflow that is the spring flood. The classic approach here involves preemptively lowering the water level to the minimum permissible mark (dead volume level), followed by passing floodwaters over the spillway. Theoretically, such a mechanism should ensure the removal of polluted water from near bottom horizons. However, in practice, the effectiveness of this method for the conditions of Verkhne-Zyryansky hydroelectric complex, is significantly reduced due to the design features of the spillway. The structure is equipped with a shaft spillway, the threshold of which is located at an elevation close to the normal headwater level (NHL). As previously established, under conditions of stable density stratification, the most mineralized layers are localized in the bottom layer. With the existing spillway design, water masses forming in the surface and intermediate horizons are flushed out. As the spillway passes, the freshest waters of standard quality are discharged into the tailwater, whereas the deep, highly mineralized waters, which pose the greatest threat to a sustainable industrial water supply, remain hydraulically trapped in depressions in the bottom relief and continue to accumulate. The traditional flushing method results in an inefficient use of flood potential, as it fails to reduce the overall mineralization of the withdrawn water. A fundamentally different approach to solving the problem, enabling the elimination of the aforementioned design flaws, is the paradigm of selective water drainage. The most promising and technologically sound implementation of this concept is the construction of a specialized siphon-type flood spillway designed to drain highly mineralized waters from the deepest zones of the reservoir. In this work, a numerical model was developed and a series of computational experiments were conducted to refine engineering solutions for ensuring a sustainable technical water supply under conditions of significant stratification of water masses.

Keywords: *water bodies, water quality modeling, vertical stratification of water masses, selective spillway*

Поступила в редакцию: 15.07.2026

Принята к публикации: 27.08.2026

ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗРАБОТКУ ТЮБЕГАТАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ (РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН)

Дьяконов М.В., ПАО «Уралкалий», г. Березники
Ляхин Ю.С., Горный институт УрО РАН, Пермь
Лучников А.И., Горный институт УрО РАН, Пермь

Разработка Тюбегатанского месторождения калийных солей в условиях сложного тектонического строения неизбежно сталкивается с рядом факторов, влияющих на безопасность и организацию производственного процесса. Одним из них является наличие аварийных водопроявлений в выработках, обусловленных процессом инфильтрации атмосферных осадков через толщу покровных отложений по системам вертикальных трещин. Интенсивность и периодичность этих водопроявлений связаны, в том числе, с гидрологическими и гидрохимическими особенностями поверхностных водных объектов в районе горного отвода месторождения. Проведенные гидрологические расчеты позволили оценить среднемноголетний водоприток поверхностных вод с водосбора в районе участка первоочередной отработки, который составил 43 м³/ч. Максимальные водоприток (более 180 м³/ч) были зафиксированы в начале июня 2012 г. и в конце мая 2018 г. и совпадали с прохождением дождевых паводков редкой обеспеченности. Гидрохимические исследования, включая лабораторный анализ, показали, что на исследуемой территории общая минерализация большинства водотоков и родников (1-10 г/л) существенно ниже, чем шахтных вод (более 300 г/л). Это свидетельствует об активных процессах растворения соледержащих горных пород. Для минимизации поступления поверхностных вод в горные выработки предложено канализовать русло р. Тюяшсай в нижнем течении на всем протяжении горного отвода. Для предупреждения возникновения аварийных ситуаций, вследствие резкого увеличения инфильтрации поверхностного стока, формируемого ливневыми осадками, рекомендуется организовать непрерывный автоматизированный мониторинг за гидрометеорологическими параметрами.

Ключевые слова: Тюбегатанское месторождение, гидрологические факторы, аварийные водопроявления, водоприток, безопасность горных работ

Введение

В настоящее время в мире существует устойчивый тренд к постоянному росту численности населения. Это создаёт в отдельных регионах дефицит продовольствия, и возникает необходимость наращивания производства минеральных удобрений, в том числе и в регионах со сложными горно-геологическими условиями [1, 2]. Располагающиеся там месторождения калийных солей характеризуются повышенными рисками, связанными со строением водоупорных пород и опасностью прорыва пресных вод в горные выработки [3, 4]. Основными источниками внезапных прорывов воды в горные выработки шахт являются поверхностные водоемы (моря, озера, водохранилища, реки и другие); поверхностные ливневые и паводковые воды; подземные водоемы в старых затопленных выработках; подземные водоносные

горизонты, приуроченные к водоносным горным породам. Из общего числа внезапных прорывов воды в горные выработки шахт примерно 10-15% приходится на прорывы воды из поверхностных водоемов, ливневых и паводковых вод [5]. При этом данный процесс характеризуется, как правило, огромными притоками воды, достигающими до нескольких десятков тысяч м³/ч. Зачастую, несмотря на комплекс принимаемых мер по защите и предупреждению аварийных ситуаций, это может приводить к затоплению рудников и невозможности их дальнейшей эксплуатации [3, 6].

Одним из характерных примеров разработки месторождения в сложных горно-геологических условиях является Тюбегатанское месторождение калийных солей [4, 7, 8]. Здесь основная опасность прорыва пресных вод в горные выработки связана с наличием разрывных тектонических нарушений.

Тюбегатанское месторождение калийных солей находится на территории Кашкадарьинского вилоята Узбекистана и Лебапского вилоята Туркменистана и разделяется пограничной рекой Шордарья на две части (Рис. 1).

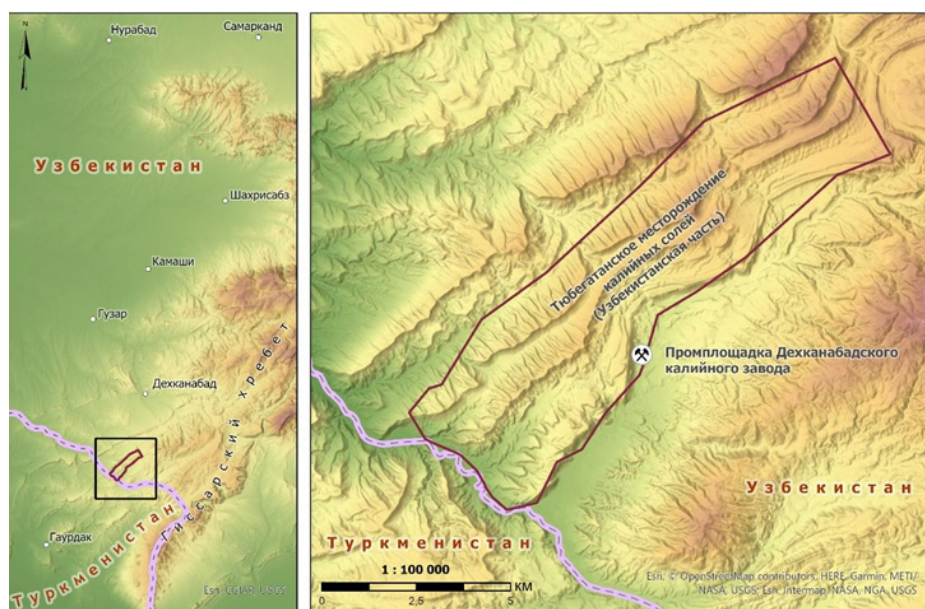


Рис. 1. Общая схема расположения Тюбегатанского месторождения калийных солей [6]

В настоящее время подземным способом разрабатывается узбекская часть месторождения, имеющая площадь подсчета запасов 31,4 км². Протяженность месторождения на территории Республики Узбекистан с юго-запада на северо-восток составляет 14 км при ширине от 1,5 до 3 км. Месторождение вскрыто тремя наклонными штольнями (стволами), пройденными с дневной поверхности комбинированным способом под углом 8-10°. Протяженность наклонных стволов составляет от 1780 до 1845 м. Разработкой месторождения на территории Республики Узбекистан с 2010 года занимается государственное унитарное предприятие Дехканабадский калийный завод (далее – ДКЗ) [4].

В разрезе месторождения представлены осадочные породы четвертичного, неогенового, мелового и юрского возраста. В продуктивной галитовой подсвите гаурдакской свиты титонского яруса верхней юры выделены три калийных горизонта: нижний, средний и верхний, разделенные промежуточными горизонтами галитового

состава. Промышленным является пласт Нижний II нижнего горизонта. Содержание полезного компонента KCl в нем составляет от 15,55 до 50,53 % (среднее – 34,3 %) при мощности от 0,8 до 12,8 м (среднее – 5,65 м) [9].

Узбекская часть Тюбегатанского месторождения приурочена к Тюбегатанской брахиантиклинали Гаурдак-Тюбегатанской антиклинальной зоны (Рис. 2) и характеризуется крайне сложным тектоническим строением [4].

Водозащитная толща (далее – ВЗТ) представляет собой пачку водонепроницаемых пород. По данным источника [8], мощность водозащитной толщи достигает 154,7 м, выклиниваясь в русле р. Тюяшсай, протекающей по юго-западной границе шахтного поля, до 34,6 м (средняя мощность – 117,2 м). Средняя глубина залегания кровли ВЗТ ~ 324 м [10].

По состоянию на 2024 год глубина проведения горных работ достигает более 700 м от дневной поверхности. Как и на большинстве калийных и соляных месторождений здесь применяется камерная система разработки с поддержанием вышележащей толщи на ленточных междуканальных целиках. На настоящий момент времени состояние горных выработок на участке первоочередной отработки оценивается как неудовлетворительное: камеры «задавлены» обрушенными породами [4].

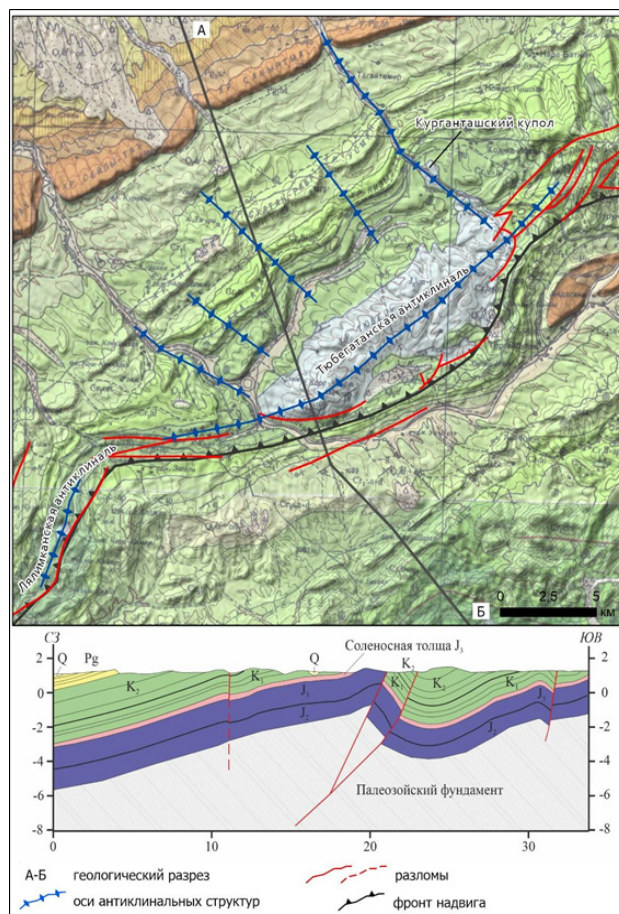


Рис. 2. Геологическая карта района Тюбегатанской антиклинали с элементами тектоники [4]

Отработка промышленных пластов месторождения в текущих условиях дополнительно осложняется наличием водопроявления, вскрытого при проходке одной из панелей шахтного поля рудника. При этом интенсивность и режим

поступления воды в выработанное пространство зависят и от гидрологических процессов, происходящих на водосборах поверхностных водных объектов. Поэтому система комплексного мониторинга, создаваемая с целью контроля состояния геологической среды для обеспечения безопасности ведения горных работ и снижения вредного воздействия на окружающую среду [11], должна строиться с учетом и гидрометеорологических факторов.

Общая характеристика гидрологических условий

Исследуемые водные объекты относятся к бассейну р. Амударьи. Постоянными водотоками являются только реки, получающие питание в горной и высокогорной зонах. Однако и здесь временными и пересыхающими водотоками выработана довольно густая гидрографическая сеть. При этом сколько-нибудь развитых речных систем в этой зоне не сформировано. Небольшие реки (саи), вытекая из предгорий, зачастую теряются на конусах выноса в районах резкого выполаживания долины (Рис. 3).



(a)



(б)

Рис. 3. Характерный вид долин и пересохших русел рек Тюяшсай (а) и Торгарсай (б) в среднем течении

Раннее наступление положительных температур и теплые дожди способствуют интенсивному сходу маломощного снежного покрова. Талые воды от сезонного снега суммируются с дождевым стоком, вызывая концентрацию основного объема годового стока в весенний период и в первую половину лета. При этом объем дождевого стока незначителен и зачастую не превышает 5-10% общего годового стока. На его подземную составляющую приходится порядка 25-35% [12].

В то же время наибольшие годовые расходы отмечаются в апреле-мае и, как правило, имеют дождевое происхождение с образованием кратковременных разрушительных селевых паводков. Гидрограф состоит из отдельных снего-дождевых паводочных пиков.

В рамках комплексных полевых работ было выполнено поучастковое рекогносцировочное обследование водосборных бассейнов р. Шордарья и ее правобережных притоков (в том числе рр. Тюяшсай, Торгарсай, Таркапчигай), расположенных как в границах горного отвода Тюбегатанского месторождения, так и за его пределами. Площадь горного отвода разделяется на 6 водосборных участков в различном соотношении. Наибольшая часть (44%) относится к водосборной площади р. Тюяшсай (Рис. 4).

Гидрологическая сеть, согласно материалам проведенных маршрутных обследований, представляет собой, в основном, пересохшие русла без поверхностного стока.

Естественный поверхностный сток выявлен на отдельных непротяжённых участках русла р. Таркапчигай (верховья р. Шордарья) и руч. Асмандара.

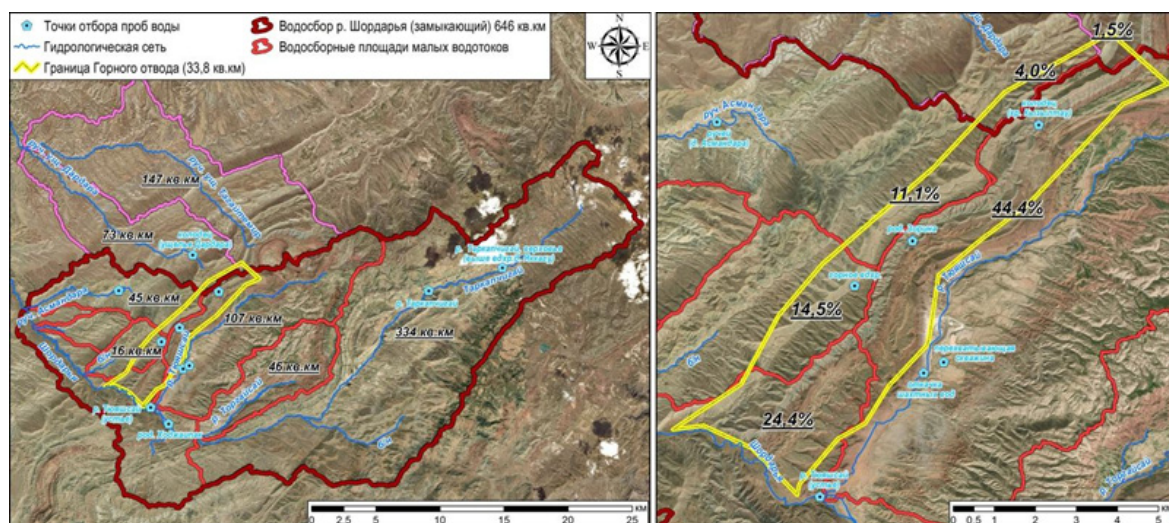


Рис. 4. Карта-схема гидрографической сети и расположения точек отбора проб воды в районе горного отвода Тюбегатанского месторождения

Отдельно необходимо отметить, что дневная поверхность русел и пойм обследованной гидрографической сети покрыта плотной земистой коркой, особенно в нижнем течении. Она представляет собой высохший трещиноватый слой из мелкодисперсных частиц с вкраплениями галечника и окатышей. Толщина слоя – от 2-3 мм в верхнем течении и до 20-40 мм в устьевых участках водотоков. Наличие корки существенно снижает способность подстилающих почв к инфильтрации непродолжительных дождевых осадков в начальный период времени их выпадения, а также увеличивает скорости движения водных потоков по руслу. Косвенно высокие скорости в верховьях рек подтверждаются и отсутствием мелкой эрозионной (ручейковой) сети, поскольку формируется сплошной слой стока по рельефу. В целом же, слабая связность грунтов, слагающих долину и пойму водотоков, способствует насыщению потока осадочными породами. Учитывая ливневый тип выпадения осадков и пересеченность местности, этот процесс приобретает «лавинообразный» характер, формируя в русле не водный, а селевой поток.

Насыщенность селевого потока обломочным материалом, по различным данным, может составлять от 10 до 75% объема движущейся массы [13]. Это приводит к увеличению площади поперечного сечения потока, и, соответственно, зоны затопления. Поэтому зафиксированные на местности отметки уровней высоких вод (далее – УВВ) характеризуют не уровень воды в прямом его понимании, а отметки растекания селевого потока по пойме.

Средний расход селевых масс р. Тюяшай в районе шахтного поля составляет $\sim 35\text{--}40 \text{ м}^3/\text{с}$, при этом максимальные значения были зафиксированы (службами ДКЗ) в начале июня 2012 г. ($\sim 120 \text{ м}^3/\text{с}$) и в конце мая 2018 г. ($\sim 100 \text{ м}^3/\text{с}$). В эти же периоды наблюдались максимальные водоприток в горные выработки, превышающие $180 \text{ м}^3/\text{час}$ [10].

Гидрологические расчеты

На рассматриваемой территории гидрологические посты отсутствуют. Поэтому для определения основных гидрологических характеристик неизученных водных объектов применялись рекомендованные методы «гидрологической аналогии» [12, 14].

Для района горного отвода Тюбегатанского месторождения расчет основных гидрологических характеристик выполнен для 6 створов (по 3 на рр. Шордарья и Тюяшсай) – выше, ниже и в центральной части шахтного поля. Результаты расчетов для 2-х центральных створов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты определения некоторых гидрологических характеристик в створах шахтного поля на рр. Тюяшсай и Шордарья

№	Река	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м БС	Средне-многолетний модуль стока, л/с км ²	Средне-годовой расход, м ³ /с	Средне-месячный расход в период междени (50%), м ³ /с	Максимальный расход воды в период половодья (1%), м ³ /с
1	р. Тюяшсай	120	1229	2,1	0,25	0,05	97,9
2	р. Шордарья	866	1082	2,0	1,73	0,97	265

Анализ построенных кривых связи $Q=f(H)$ для отдельных створов на р. Тюяшсай позволил сделать вывод о том, что в нижнем течении реки перед впадением в р. Шордарья в период максимального подъема уровней воды на 3-4 м (УВВ) происходит выход вод из ложа русла и затопление поймы (Рис. 5). Это приводит к увеличению площади инфильтрации паводковых вод в подземные горизонты.

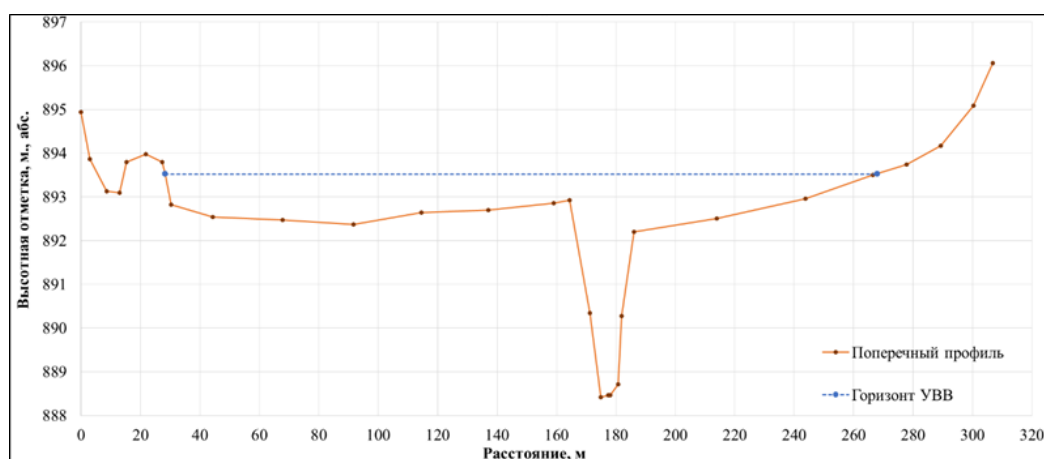


Рис. 5. Поперечный профиль долины р. Тюяшсай в устьевой части с указанием уровня высоких вод (расстояние от левого берега)

Дальнейшие расчеты показали, что среднемноголетний водоприток поверхностных вод с водосбора составляет 43,2 м³/час – для участка первоочередной отработки, 115,2 м³/час – для северо-восточного участка и 72 м³/час – для юго-западного.

Минимальный же среднемесячный водоприток с водосбора (период межени 50% обеспеченности) для участка первоочередной отработки составляет 18 м³/час, для северо-восточного участка – 54 м³/час, для юго-западного – 36 м³/час.

Гидрохимические исследования

Из поверхностных водных объектов, мест разгрузки подземных вод, родников и колодцев, в назначенных по результатам рекогносцировки створах были отобраны пробы воды на химический анализ с выполнением необходимых гидрометрических измерений. Непосредственно при отборе проб воды дополнительно определялся ряд важных физико-химических показателей с применением портативных мультипараметрических датчиков.

Подземные воды обнаружены в 4 источниках (2 родниках – Ходжаипак, Зорина и 2 колодцах) (Рис. 6). Глубина горизонта воды в колодцах – ~2-3 метра от поверхности земли, высота водного столба – 1-3,5 метра. За весь период обследований отобрано 20 проб воды на количественный химический анализ (КХА) по 11 компонентам.



(а)



(б)

Рис. 6. Общий вид родника Ходжаипак (а) и колодца в ущелье Дардара (б) на участке обследования

Полученные данные о химическом составе вод из поверхностных и подземных источников позволили провести обобщенный анализ и сделать ряд выводов.

Воды р. Таркапчигай выше района работ и горного водохранилища (Рис. 4, Табл. 2) могут быть приняты в качестве «фоновых». Вода в р. Таркапчигай относится к разряду пресных (минерализация до 1000 мг/дм³). По ионному составу преобладают гидрокарбонаты (до 403 мг/дм³), сульфаты (до 374 мг/дм³), кальций (до 169 мг/дм³) и натрий (до 111 мг/дм³).

Горное водохранилище (используется для водопоя скота) образуется за счет поверхностного склонового стока (дождевые осадки) и также характеризуется пресным характером вод (минерализация около 600 мг/дм³ – наименьшая в сравнении с другими источниками воды в районе исследований).

Для большинства мест выхода подземных вод картина иная. Воды в них уже характеризуются как среднеминерализованные (4-5 г/дм³ – родник Зорина, колодцы Дардара и Кызылтау) и минерализованные (до 12 г/дм³ – руч. Асмандара) (Табл. 2).

Воды всех остальных источников (р. Тюяшсай – устье, родник Ходжаипак, перехватывающая скважина, откачки шахтных вод) характеризуются как рассолы

(минерализация более 50 г/дм³). В составе этих вод преобладают хлорид-ионы (до 174 г/дм³), натрий (до 123 г/дм³) и калий (до 26 г/дм³).

Таблица 2

**Результаты определения физико-химических показателей и лабораторных анализов
поверхностных и подземных вод из некоторых источников**

Параметр	Единицы измерения	Горное вдхр	р. Таркапчигай	Родник Зорина	Колодец в ущелье Дардара	Ручей Асман-дара	Родник Ходжаипак	Откачка шахтных вод
Кальций	мг/дм ³	36	169	543	225	401	1992	1920
Магний	мг/дм ³	24,4	87	330	403	697	394	1492
Натрий	мг/дм ³	126	111	416	853	1762	39660	123300
Калий	мг/дм ³	148	9,6	33	22,8	36	857	26150
Гидрокарбонаты	мг/дм ³	226	403	285	481	337	241	174
Сульфаты	мг/дм ³	62	304	2773	2000	3634	3550	3221
Общая минерализация	мг/дм ³	572	1060	5179	5051	12249	94409	357993
Плотность	кг/м ³	996	995	1002	1003	1007	1064	1200
Жесткость общая	°Ж	1,38	5,74	42,8	36,9	77	109	205
Хлорид-ион	мг/дм ³	7,11	32,3	152	624	1062	46493	174830
Бромид-ион	мг/дм ³	<0,05	0,097	0,149	2,03	1,98	129	115
рН		8,04	7,76	7,4	7,51	7,72	6,87	7,05
Удельная электропроводность	µСим	363	1180	5070	5860	12520	122100	>200000
Температура	°С	20,9	18	26	17,6	19,9	22,8	26,8

Во всех поверхностных водных объектах, кроме р. Тюяшсай в устьевой части, концентрации основных макрокомпонентов значительно ниже (на один-два порядка), чем в шахтных водах. Исключением являются концентрации гидрокарбонатов, которые в поверхностных водных объектах, как правило, всегда выше, чем в подземных.

Выполненные в работе [4] геомеханические расчеты показали, что на участке первоочередной отработки уже на сегодняшний момент времени в ВЗТ сформированы зоны субвертикальной трещиноватости, которые могут служить каналами для поступления поверхностных вод в выработанное пространство рудника. Учитывая относительно низкую их минерализацию на рассматриваемой территории, возникают благоприятные условия для интенсификации процессов растворения солесодержащих горных пород.

Заключение

Комплекс натурных гидрологических и гидрохимических исследований на водосборах рек, прилегающих к Тюбегатанскому месторождению калийных солей,

а также выполненные расчеты, позволили сформулировать ряд выводов и рекомендаций, направленных на повышение безопасности производства горных работ.

Особенности формирования поверхностного стока, связанные с его сезонностью, морфологическими особенностями водосборов (крутизной склонов), селевым характером движения вод по гидрографической сети, обуславливают необходимость рассмотрения и реализации мероприятий, направленных на уменьшение инфильтрации из русел основных водотоков, прилегающих к территории горного отвода. Одним из таких мероприятий может быть канализирование русел. Гидрологические расчеты показали, что среднемноголетний водоприток поверхностных вод с водосбора составляет 43,2 м³/час – для участка первоочередной отработки, 115,2 м³/час – для северо-восточного участка и 72 м³/час – для юго-западного.

Повышенная трещиноватость грунтов, существенная внутригодовая неравномерность распределения поверхностного стока и пресный характер вод создают благоприятные условия для интенсификации процессов растворения горных пород и последующего их поступления в горные выработки уже в виде рассолов. Это приводит к существенному затруднению процессов разработки месторождения и повышению эксплуатационных затрат, в том числе увеличивает риск развития негативных техногенных процессов.

Система гидрометеорологического мониторинга на месторождениях с рассматриваемыми особенностями также должна строиться с учетом «залповости» образования поверхностного стока. Ввиду того, что максимальные значения расходов воды (селевого потока) могут формироваться в течение нескольких часов с начала выпадения ливневых осадков, необходимо вести наблюдения в непрерывном автоматическом режиме с применением специализированного оборудования. При этом измерения должны затрагивать все фазы водного режима рек рассматриваемой территории, а расположение измерительных комплексов в бассейне должно обеспечивать заблаговременность получения информации о выпадении осадков и формирующейся волне половодья и паводка.

Библиографический список

1. *Pumjan S., Long T.T., Loc H.H., Park E.* Deep well injection for the waste brine disposal solution of potash mining in Northeastern Thailand // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Т. 311. – С. 114821. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114821
2. *Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Сахаров Е.М., Бергер Р.В.* Закономерности геодинамических явлений при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений калийно-магниевых солей // *Горная промышленность*. – 2023. – №1. – С. 89-94. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-89-94
3. *Prugger F.F., Prugger A.F.* Water problems in Saskatchewan potash mining - what can be learned from them // *CIM Bulletin*. – 1991. – Vol. 84. – № 945. – P. 58-66.
4. *Барях А.А., Санфиров И.А., Дьяконов М.В., Лобанов С.Ю., Никифорова А.И.* Информационное обеспечение геомеханических расчетов устойчивости подработанного породного массива со сложным тектоническим строением // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2024. – Т. 24. – ES1012. DOI: 10.2205/2024es000894
5. *Калмыков Е.П.* Борьба с внезапными прорывами воды в горные выработки. – Москва: Издательский дом «Недра», 1973. – 240 с.
6. *Барях А.А., Евсеев А.В.* Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 9. – С. 5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29

7. Чайковский И.И. Тектонические особенности района Тюбегатанской антиклинали // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 38 - 41.
8. Кудряшов А.И., Грибков Д.С. Горно-геологические условия разработки Тюбегатанского месторождения калийных солей // Рудник будущего. Пермь. – 2010. – Вып. 1. – С. 11-14.
9. Поздеев А.А., Земсков А.Н., Ибрагимов Г.И. Некоторые аспекты освоения Тюбегатанского месторождения калийных солей // Рудник будущего. – 2010. – №1. – С. 6 - 10. – EDN: РОЕНWH.
10. Дьяконов М.В., Малеев Э.Е., Герасимова И.Ю. Активизация карстовых процессов при техногенном воздействии на Тюбегатанском месторождении калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2026. – № 2. – С. 25-36.
11. Дьяконов М.В., Герасимова И. Ю., Малеев Э.Е., Степанов Ю.И., Шулаков Д.Ю. Обоснование системы комплексного мониторинга геологической среды месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 136–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_136
12. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность / Под ред. Н. Д. Шека; Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. – 30 с.
13. Перов В.Ф. Селеведение. – Москва: Географический факультет МГУ, 2012. – 272 с.
14. СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». – М.: Госстрой России, 2004. – URL: <http://base.garant.ru/3924385/> (дата обращения: 29.07.2026)

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Горного института УрО РАН (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6 Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования).

Для цитирования:

Дьяконов М.В., Ляхин Ю.С., Лучников А.И. Влияние гидрологических факторов на разработку Тюбегатанского месторождения калийных солей (Республика Узбекистан) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 49–59. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.3>

Сведения об авторах:

Дьяконов Максим Владимирович, руководитель проектного офиса по строительству нового рудника СКРУ-2, Публичное акционерное общество «Уралкалий» (ПАО «Уралкалий»), 618426, Пермский край, г. Березники, ул. Пятилетки, д. 63; e-mail: Maksim.Dyakonov@uralkali.com, ORCID:0009-0009-0423-5660

Ляхин Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78А; e-mail: Ljahin85@mail.ru. ORCID: 0000-0001-8058-5587

Лучников Антон Игоревич, ведущий инженер лаборатории проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: Luchnikovanton@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0660-2462

INFLUENCE OF HYDROLOGICAL FACTORS ON THE DEVELOPMENT OF THE TYUBEGATAN POTASSIUM SALT DEPOSIT (REPUBLIC OF UZBEKISTAN)

Dyakonov M.V.¹, Lyakhin Yu.S.², Luchnikov A.I.²

¹*PJSC Uralkali, Berezniki*

²*Mining Institute UB RAS, Perm*

The development of the Tyubegatan potash deposit, characterized by a complex tectonic environment, inevitably faces a number of factors affecting safety and organization of the production process. One of these is the occurrence of emergency water seepage in the workings, caused by precipitation infiltrating through the cover deposits via systems of vertical fractures. The intensity and frequency of these water seepage events are related, among other factors, to the hydrological and hydrochemical characteristics of surface water bodies in the area of the deposit's mining allotment. Hydrological calculations allowed us to estimate the long-term average surface water inflow from the catchment area near the primary mining site, which amounted to 43 m³/h. Maximum water inflows (over 180 m³/h) were recorded in early June 2012 and late May 2018 and coincided with rare rain floods. Hydrochemical studies, including laboratory analysis, showed that the total mineralization of most streams and springs in the study area (1-10 g/L) is significantly lower than that of mine waters (over 300 g/L). This indicates active dissolution of salt-containing rocks. To minimize surface water infiltration into the mine workings, deepening and straightening work is proposed to create a channel for the Tyushsay River downstream along the entire length of the mining allotment. To prevent emergencies resulting from a sharp increase in surface runoff infiltration caused by heavy rainfall, the implementation of continuous automated monitoring of hydrometeorological parameters is recommended.

Keywords: *Tyubegatan deposit, hydrological factors, emergency water occurrences, water inflow, mining safety*

Поступила в редакцию: 30.07.2026

Принята к публикации: 31.08.2026

РЕЖИМНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ: ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЗУПЛОТНЕНИЯ, ПРОНИЦАЕМОСТИ И ВТОРИЧНОЙ ГЛИНИСТОСТИ

Егорова А.Б., Горный институт УрО РАН, Пермь

Санфиров И.А., Горный институт УрО РАН, Пермь

Тезиков А.Д., Горный институт УрО РАН, Пермь

В работе представлены результаты режимных геофизических исследований скважин (ГИС), выполненных в 2021-2025 гг. в инженерно-геологических скважинах в пределах шахтного поля затопленного рудника. Целью исследований являлась разработка и апробация методики количественной оценки зон развития вторичных геологических процессов по разрезу скважин. Применён комплекс методов: акустический широкополосный каротаж (АК) с определением V_p и V_s , гамма-каротаж (ГК) и гидродинамические исследования (ГДИ). На основе комплексной интерпретации упругих и радиометрических параметров разработана петрофизическая модель для выделения: 1) интервалов разуплотненных карбонатов (снижение акустического импеданса AI и объёмного модуля упругости K на 25-40%), 2) проницаемых зон (пористость $>10\%$, $\Delta t_{log} > 170,6$ мкс/м, подтверждены ГДИ), 3) зон повышенной суффозионной (вторичной) глинистости ($V_p V_s > 2.2$, объёмный модуль упругости $K < 20$ ГПа, рост ГК на 15-25% и аномально низкий модуль сдвига G). Количественные критерии разделения основаны на пороговых значениях упругих параметров (V_p/V_s , акустические импедансы, модули сдвига и сжатия) и петрофизических параметров (коэффициентов глинистости и пористости).

Ключевые слова: режимные геофизические исследования скважин, акустический каротаж, V_p/V_s , инженерная геофизика, суффозия, карст, Верхнекамское месторождение

Введение

Активное техногенное воздействие, особенно в районах исторической горнодобычи, часто приводит к изменению инженерно-геологических условий, что создаёт угрозу устойчивости существующей инфраструктуры. Затопленные шахтные поля являются зонами потенциального развития опасных инженерно-геологических процессов, таких как суффозия и карстообразование.

Традиционные методы инженерно-геологических изысканий (отбор и испытание керн) обеспечивают точечную информацию о разрезе и слабо пригодны для отслеживания динамики изменений во времени [1]. В этой связи возрастает роль скважинной геофизики, способной предоставлять непрерывные, высокодетальные и воспроизводимые данные о свойствах пород по стволу скважины [2]. Особенно ценным является возможность прямого расчета ключевых динамических упругих параметров – отношения V_p/V_s , акустических импедансов и упругих модулей сдвига и сжатия, которые являются интегральными индикаторами механической целостности, деформационных свойств и напряженного состояния породного массива. Однако до настоящего времени в практике инженерно-геологического скважинного мониторинга

недостаточно разработаны методики, позволяющие не просто фиксировать наличие аномалий, но и осуществлять их дифференциальную диагностику – разделить зоны по степени зрелости карсто-суффозионных процессов: *зоны разуплотнения, проницаемости и суффозионного глинистого заполнения*, что принципиально важно для оценки механизма и стадии развития вторичных процессов [3].



Рис. 1. Схема расположения инженерно-геологических скважин, в которых проводились режимные геофизические исследования с 2021 по 2025 гг.

Материалы и методы

Объект и условия исследований

Работы проводились на участке в пределах затопленного рудника Верхнекамского месторождения калийных солей. Глубина инженерно-геологических скважин – до 80 м. Режимные наблюдения проводились ежегодно в период с 2021 по 2025 гг. (Рис. 1) включительно. Исследования в скважинах выполнялись аппаратурой компании Mount Sopris instrument [4].

Разрез представлен четвертичными отложениями (4-7 м) и терригенно-карбонатной толщей уфимского яруса нижней перми (44-65 м), включающей известняки, глины, мергели [5] (Рис. 2).

Комплекс геофизических исследований

Режимные геофизические исследования в период с 2021 по 2025 гг. (Рис. 1) выполнялись согласно графику задач. Ежегодно проводились изменения акустического каротажа (АК) и гамма-каротажа (ГК) в мониторинговых скважинах, это сформировало непрерывный набор данных изменения упругих параметров и глинистости. Гидродинамические исследования (ГДИ) и инклинометрия (ИНК) выполнялись на

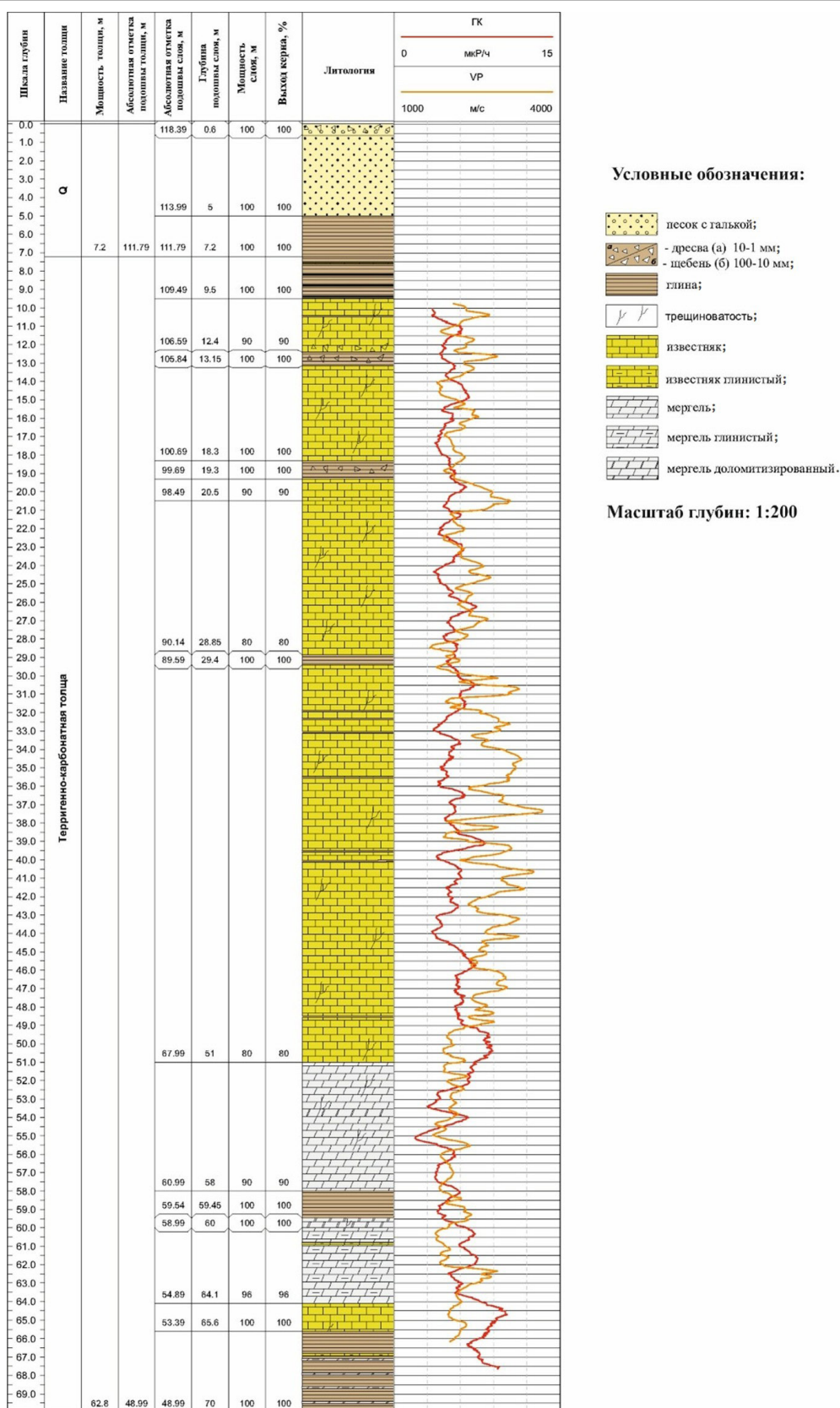


Рис. 2. Сводный геолого-геофизический разрез исследуемых инженерно-геологических скважин

первоначальном этапе для получения базовых фильтрационных характеристик и пространственной привязки ствола скважины. В дальнейшем ГДИ проводились повторно по мере необходимости – при возникновении признаков активизации карсто-суффозионных процессов. Комплекс режимных геофизических методов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Применяемые геофизические методы и решаемые задачи

Метод	Аппаратура	Измеряемые параметры	Решаемые диагностические задачи
Акустический каротаж (АК)	QL40-FWS (full-waveform sonic)	– Интервальное время Δt (мкс/фут) – Скорости V_p, V_s (м/с) – Амплитуда/затухание волн	– Оценка пористости – Расчет упругих модулей – Выделение разуплотненных зон по снижению V_p, V_s – Фиксация затухания как признака глинистости/неоднородности
Гамма-каротаж (ГК)	QL40-GR (NaI(Tl) детектор)	– Естественная гамма-активность (API, мкР/ч)	– Литологическое расчленение (глины/карбонаты) – Расчет коэффициента глинистости (V_{sh}) – Отделение первичных глин от вторичного глинистого материала
Гидродинамические исследования (ГДИ)	Комплекс для ГДИ	– Расход (л/с) – Температура – Удельное электрическое сопротивление	– Прямое выделение водопроводящих (проницаемых) зон – Оценка интенсивности притока /поглощения. – Верификация расчетных фильтрационных параметров
Инклинометрия (ИНК)	QL40-APS	– Зенитный угол и азимут ствола	– Точная пространственная привязка данных АК и ГК – Учет поправок на отклонение ствола

Методы обработки и интерпретации

Обработка данных выполнялась в программном комплексе WellCAD [7]. Для решения поставленных задач использован следующий алгоритм петрофизической интерпретации:

1. Расчет упругих и прочностных параметров

На основе измеренных скоростей V_p, V_s и оцененной объемной плотности породы (ρ) рассчитаны ключевые инженерно-геологические параметры. Расчет объемной плотности породы (ρ) выполнен методом компонент из объемной минеральной модели с калибровкой на лабораторные керновые исследования.

- Отношение (V_p/V_s): $R_{V_p/V_s} = \frac{V_p}{V_s}$ (1)

V_p/V_s характеризует соотношение между скоростями продольной и поперечной волн. Является надёжным индикатором литологии, насыщения и трещиноватости.

- Сдвиговый импеданс (SI): $SI = \rho \cdot V_s \cdot \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} \right)$ (2)

SI характеризует акустическую «жесткость» породы по отношению к сдвиговым волнам. Чувствителен к минеральному составу скелета породы, пористости и форме

пор, а также к трещиноватости; не зависит от флюидонасыщения (в отличие от продольного импеданса), что делает его ценным для литологического разделения и выявления трещин.

- Акустический импеданс (AI): $AI = \rho \cdot V_p \cdot \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} \right)$ (3)

AI характеризует акустическую «жесткость» породы и является чувствительным индикатором литологии и пористости.

- Объёмный модуль упругости (K): $K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3} \cdot V_s^2)$, (Па) (4)

K определяет сжимаемость породы упругой деформации при изменении давления.

- Модуль сдвига (G): $G = \rho \cdot V_s^2$, (Па) (5)

G характеризует сопротивление сдвиговым деформациям.

2. Литологическое расчленение

Литологическое расчленение выполнялось на основе кластерного анализа упругих параметров и объемной рассчитанной объемной глинистости [8] (Рис. 3-5):

- **Глины/Аргиллиты:** высокий ГК, высокое V_p/V_s (>2.2), низкие значения AI, K и G.
- **Мергели:** средний ГК, V_p/V_s в диапазоне 1.9-2.3, промежуточные значения AI, K.
- **Плотные известняки:** низкий ГК, низкое V_p/V_s (1.8-2.0), высокие абсолютные V_p , V_s , максимальные значения AI, K и G.
- **Разуплотненные известняки:** низкий ГК, повышенное V_p/V_s (2.0-2.4) относительно фона, сниженные V_p , V_s , AI, K и G.

3. Выделение проницаемых интервалов (коллекторов):

- Рассчитывалась пористость по калиброванной зависимости [9]:

$$\Phi_{cal} = 0.85 \cdot \left[\frac{(\Delta t_{log} - 47.0)}{(189 - 47.0)} \right] + 0.02 \quad (R^2 = 0.76) \quad (6)$$

- Критерий проницаемости:

$$\Phi_{cal} \geq 10\%, \text{ что соответствует } \Delta t_{log} > 170,6 \text{ мкс/м}$$

Дополнительное подтверждение: снижение модуля сдвига (G) и модуля сжатия (K) в данных интервалах, верификация по ГДИ (Рис. 6).

4. Выделение зон повышенной суффозионной глинистости

Интервалы повышенной суффозионной глинистости выделялись по сочетанию признаков: а) повышенное V_p/V_s (>2.2); б) умеренное увеличение ГК; в) резкое снижение V_s , K и G до значений, характерных для глин; г) приуроченность к водопроводящим зонам по ГДИ.

Это наиболее сложная диагностическая задача, требующая отделения зон, где глинистый материал является первичным (исходные глинистые прослои или мергели), от зон, где он является вторичным (заполнитель трещин и каверн, привнесенный фильтрующимися водами). Для этого предложен комплексный диагностический параметр (КДП), где все параметры нормированы на фоновые значения для плотных известняков [10]:

$$\text{КДП} = \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)_{norm}}{(GR)_{norm}} \right] \cdot \left(\frac{1}{V_{s_{norm}}} \right) \quad (7)$$

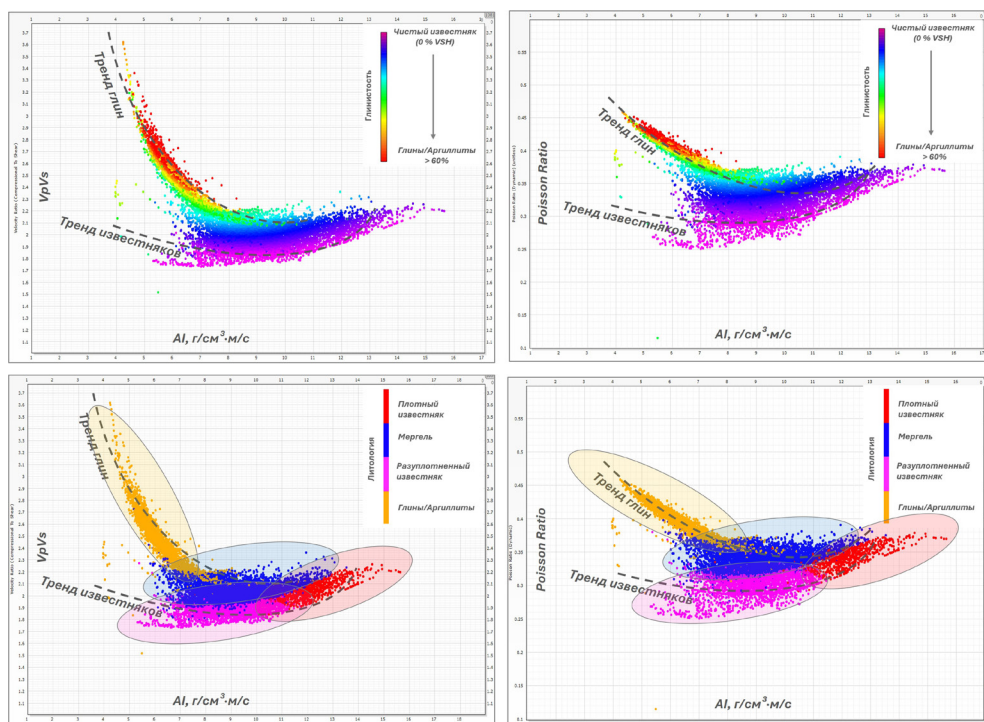


Рис. 3. Кластерный анализ разделения по литологии по упругим параметрам акустического импеданса AI и отношения Vp/Vs

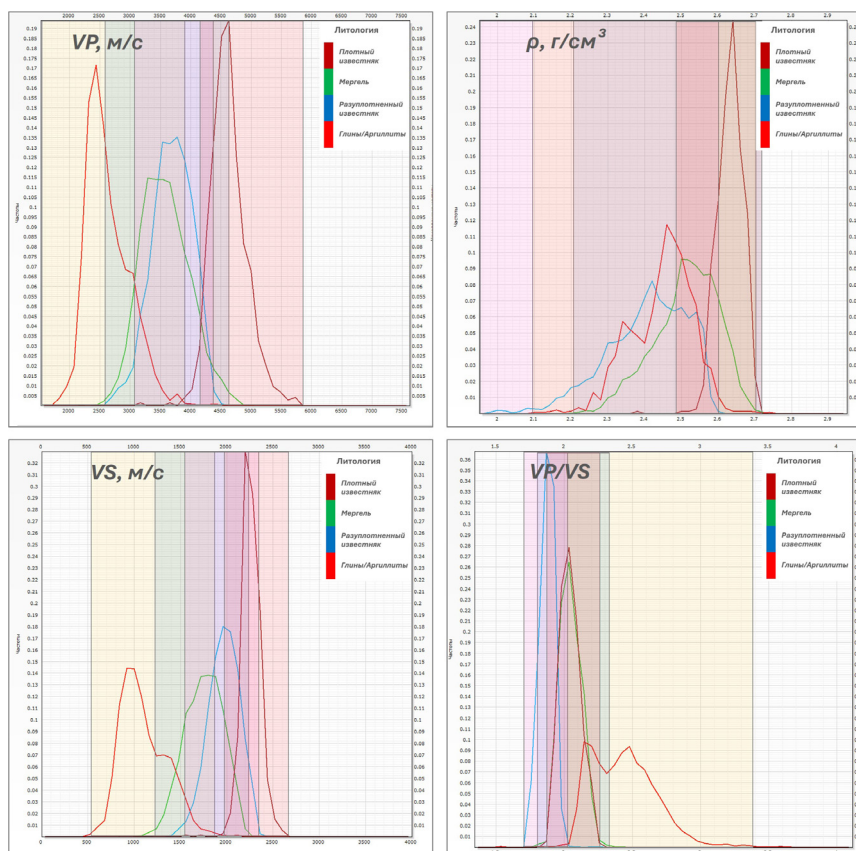


Рис. 4. Кластерный анализ разделения по литологии по упругим параметрам скорости продольной Vp и поперечной волны Vs , объемной плотности ρ и отношения Vp/Vs

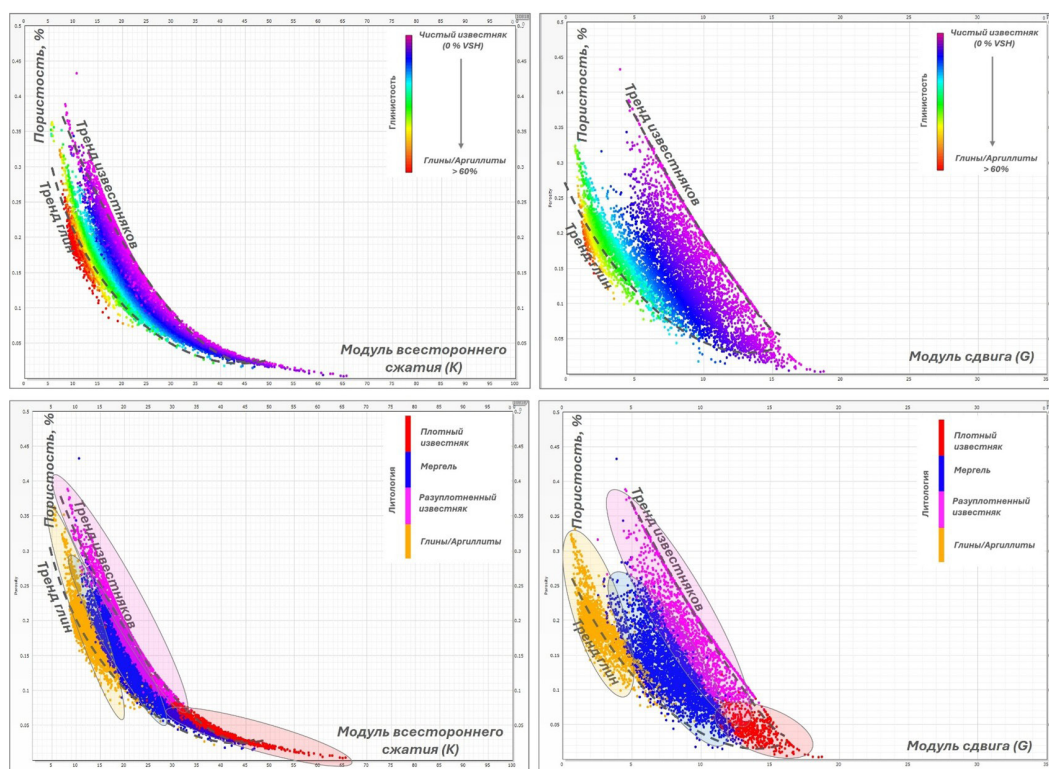


Рис. 5. Кластерный анализ разделения по литологии и глинистости по упругим параметрам. Модуль сдвига G , объёмный модуль упругости (K)

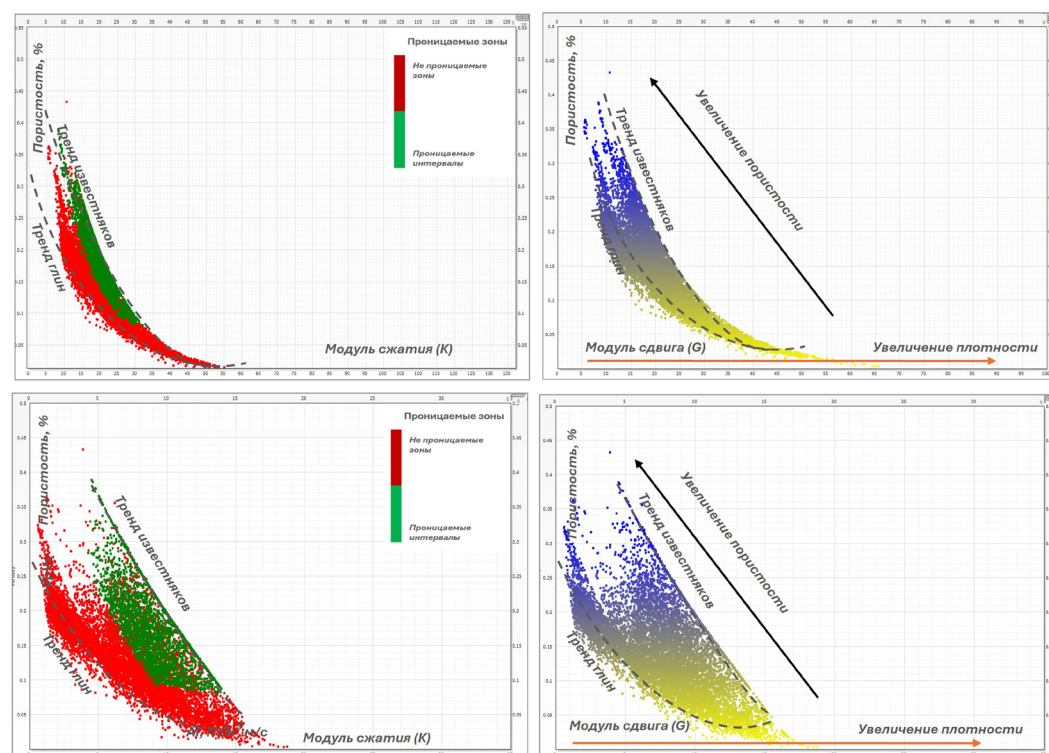


Рис. 6. Кластерный анализ разделения по проницаемости (проницаемые и не проницаемые зоны) и пористости по упругим параметрам. Модуль сдвига G , объёмный модуль упругости (K)

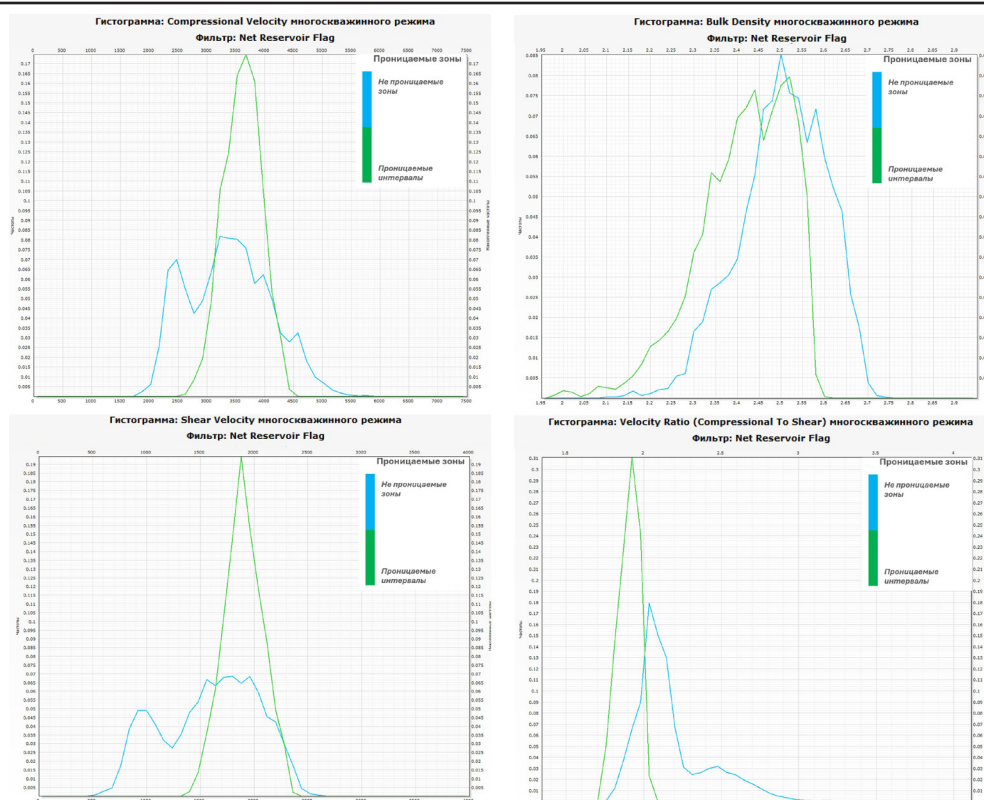


Рис. 7. Кластерный анализ разделения по проницаемости (проницаемые и не проницаемые зоны) по упругим параметрам скорости продольной V_p и поперечной волны V_s , объемной плотности ρ и отношения V_p/V_s

Интерпретация КДП

- **Высокие значения КДП (>1)** указывают на интервалы, где наблюдаемое увеличение V_p/V_s и, возможно, ГК, существенно превышает то, что характерно для первичных глин с аналогичным уровнем ГК, и сопровождается резким падением V_s . Это диагностический признак суффозионного заполнения.
- Дополнительными критериями являются приуроченность к водопрводящим зонам по ГДИ, сильное акустическое затухание, пространственная невыдержанность (линзовидный характер аномалии).

Результаты

1. Литологическое расчленение. Кластерный анализ позволил уверенно разделить все четыре типа пород. Интервалы трещиноватых известняков выделены **в скважинах 1х, 7х, 8х, 9х**. Их характерные признаки: кластер точек со сдвигом в область $V_p/V_s = 2.1-2.3$ при низких значениях ГК, а также отчетливое снижение акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K) на 25-40% относительно фона плотных известняков [11] (Рис. 3-5). В скважинах **2х-6х** подобные аномалии незначительны, упругие параметры близки к фоновым, но все же отмечаются.

2. Выделение проницаемых интервалов. Интервалы с пористостью $>10\%$ идентифицированы как проницаемые. Наибольшие мощности таких интервалов и их высокая пористость (до 25-30%) зафиксированы в скважинах 1х, 7х, 8х, 9х (Табл. 2). В скважине 7х проницаемый интервал 41.0-64.3 м, рассчитанный по АК, полностью

совпал с интервалом, где ГДИ выделило 8 водопроводящих зон с притоком ~ 9.8 л/с. В проницаемых интервалах наблюдается закономерное снижение модуля сдвига G , коррелирующее с ростом пористости (Рис. 6-7).

3. Локализация зон повышенной суффозионной глинистости. Анализ совместного поведения V_p/V_s , ГК и упругих параметров позволил выделить интервалы с признаками суффозионного заполнения. Наиболее ярко эти признаки проявились в скважинах 1х и 9х, а также 7х и 8х. Для этих интервалов характерны (Рис. 3):

- максимальные значения V_p/V_s для данных скважин (до 2.4-2.5);
- рост показаний ГК на 15-25% относительно фона плотных известняков;
- аномально низкие значения модуля сжатия (K) и модуля сдвига (G), соответствующие значениям для глинистых пород;
- сильное акустическое затухание;
- пространственная связь с интервалами максимальной рассчитанной проницаемости.

В скважинах 2х, 6х, 4х признаки вторичной глинистости выражены слабее: наблюдается умеренный рост V_p/V_s и незначительное снижение K , но радиационный фон и коэффициент Пуассона меняются мало. В скважинах 2х-6х такие зоны не выявлены, упругие параметры стабильны (Рис. 3-5).

Разработанный алгоритм, включающий расчет и анализ упругих констант, показал высокую эффективность для дифференциальной диагностики типов изменений в карбонатном массиве.

Разуплотненные известняки уверенно отделяются от плотных не только по росту V_p/V_s при низком ГК, но и по отчетливому снижению акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K). Это количественно подтверждает факт разуплотнения и снижения жесткости массива без существенного привноса глинистого материала (Рис. 6-7).

Проницаемые (проводящие) зоны, выделенные по пористости $>10\%$, демонстрируют закономерное снижение модуля сдвига (G), что физически обосновано уменьшением жесткости скелета с ростом пустотности. Полная корреляция с данными ГДИ подтверждает адекватность калибровки акустического метода.

Зоны вторичной глинистости диагностируются по уникальной комбинации: высокое V_p/V_s (следствие резкого снижения V_s глинистым заполнителем), сопутствующий рост ГК, критическое снижение модуля сжатия (E) и модуля сдвига (G) до значений глин. Именно комплексное использование этих параметров позволяет надежно отделить вторичное суффозионное заполнение от первичных глинистых прослоев, для которых характерен высокий ГК, но иные соотношения между V_p/V_s и упругими модулями. Это прямое указание на активный суффозионный процесс – вынос мелкозернистого материала с последующим заполнением трещин, что кардинально меняет деформационные свойства породы.

Пространственное распределение результатов выявило закономерность: наиболее активные процессы (совместное развитие трещиноватости, высокой проницаемости и суффозионной глинистости) сконцентрированы в северо-восточной части изучаемого участка (скв. 1х, 9х) и в его южной части (скв. 7х, 8х). Это позволяет предположить наличие здесь преимущественного направления фильтрационного потока или тектонической предрасположенности. Зоны, где зафиксировано резкое падение модуля сжатия, представляют наибольший инженерно-геологический риск [12] (Рис. 5).

Ограничения методики включают возможное занижение пористости в зонах изолированных каверн и необходимость точной калибровки плотности (ρ) для корректного расчета AI, K, G. Однако использование режимных данных позволяет нивелировать эти ограничения, отслеживая относительные изменения параметров во времени, что повышает надежность диагностики.

Таблица 2

**Результаты петроупругого разделения вторичных изменений
в мониторинговых скважинах**

№ скважины	Интервалы разуплотненных известняков, м	Средняя пористость в коллекторах, %	Среднее значение объёмного модуля упругости (K), ГПа	Признаки суффозионной глинистости	Приток по ГДИ
1х	48.5-52.1; 58.0-62.5	18-22	18-22 (снижен)	Сильные ($V_p/V_s > 2.3$, рост ГК, $E < 20$ ГПа, $\nu > 0.32$)	Отмечен
2х	41.0-64.3	12-15	35-38 (незнач. сниж.)	Умеренные, локальные	Сильный (9.8 л/с)
3х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
4х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
5х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
6х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
7х	67.5-70.0; 72.0-74.5	20-28	15-25 (снижен)	Сильные	Сильный (9.8 л/с)
8х	59.5-63.0	17-23	25-35 (снижен)	Сильные/ умеренные	Отмечен
9х	50.5-55.0; 60.0-65.5	19-24	15-20 (снижен)	Сильные ($V_p/V_s > 2.4$, рост ГК, $K < 20$ ГПа, $\nu > 0.33$)	Отмечен

Выводы

На основе комплекса режимных АК и ГК разработаны и апробированы количественные петрофизические и геомеханические критерии для отдельного выделения зон трещиноватости, проницаемости и вторичной глинистости в карбонатных отложениях. Ключевую диагностическую роль играют комплексный анализ V_p/V_s , акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K).

Установлено, что наиболее интенсивное комплексное развитие всех трёх типов аномалий, указывающее на активные суффозионные процессы, происходит в районе скважин 1х и 9х, а также 7х и 8х. Для этих зон характерно сочетанное проявление повышенного V_p/V_s , роста ГК, минимальных значений модуля сжатия.

Выделенные проницаемые интервалы с признаками суффозионной глинистости, характеризующиеся одновременно высокой фильтрационной способностью и резко сниженными значениями модуля сжатия ($K < 20$ ГПа), представляют наибольшую инженерно-геологическую опасность, так как указывают на существенную потерю породным массивом несущей способности.

Полученные результаты, включая карты распределения упругих параметров, формируют объективную, физически обоснованную основу для ранжирования территории по степени риска и планирования целенаправленных превентивных мероприятий по инженерной защите.

Библиографический список

1. Глебов С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2006. – 156 с.
2. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2020. – 710 p.
3. Баяк И.О. Петроупругое моделирование как способ анализа анизотропии упругих свойств в масштабах сейсмических съемок // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – № 2. С. 18–23.
4. Калинин Д.Ф., Смирнов А.В. Акустический каротаж: теория и практика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 210 с.
5. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей: монография. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
6. Иванников А.П., Хмелевской В.К. Гидродинамические исследования скважин: учебное пособие. – М. РГУ нефти и газа, 2015. – 180 с.
7. Алексеев С.Г. Петрофизическое моделирование терригенно-карбонатных разрезов по данным ГИС // Геофизика. – 2022. – № 3. – С. 30–38.
8. Кашиников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259–267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259
9. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород): учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
10. Чайковский И.И. Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского калийного месторождения // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 41–44.
11. Санфиоров И.А., Чугаев А.В., Трапезникова А.Б., Тезикова А.Д. Направления развития сейсморазведочного мониторинга водозащитной толщи действующих соляных рудников // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.04
12. Чугаев А.В. Теоретические основы и практика малоглубинных скважинных сейсмических исследований при эксплуатации месторождений водорастворимых полезных ископаемых: дис. докт. техн. наук. – Пермь, 2024. – 180 с.

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания «ГИ УрО РАН» (рег. номер 126012716041-5).

Для цитирования:

Егорова А.Б., Санфиоров И.А., Тезиков А.Д. Режимные геофизические исследования в инженерно-геологических скважинах: выделение зон разуплотнения, проницаемости и вторичной глинистости // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 60–71. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.4>

Сведения об авторах:

Егорова Анна Борисовна, инженер, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78А; e-mail: a.b.trapeznikova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3882-6786

Санфиоров Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: sanf@mi-perm.ru, ORCID: 0000-0002-9190-4296

Тезиков Артемий Дмитриевич, инженер, «ГИ УрО РАН»; e-mail: artemiitezikov@gmail.com, ORCID: 0009-0000-2115-4875

MONITORING GEOPHYSICAL SURVEYS IN ENGINEERING-GEOLOGICAL BOREHOLES: IDENTIFICATION OF DISINTEGRATION ZONES, PERMEABILITY, AND SECONDARY CLAY ALTERATION

Egorova A.B., Sanfirov I.A., Tezikov A.V.

Mining Institute UB RAS, Perm

This paper presents the results of time-lapse borehole geophysical surveys conducted between 2021 and 2025 in engineering-geological boreholes within the mine field of a flooded mine. The objective of this research was to develop and validate a methodology for the quantitative assessment and dynamic monitoring of zones affected by secondary geological processes along borehole sections. A comprehensive suite of methods was employed, including wideband acoustic logging (for V_p and V_s determination), gamma-ray logging (GR), and hydrodynamic testing (HDT). An integrated interpretation of elastic and radiometric parameters enabled the development of a petrophysical model for the identification of: (1) intervals of decompacted carbonates (reduction in acoustic impedance (AI) and B elastic bulk modulus (K) by 25-40%), (2) permeable zones (porosity $>10\%$, $\Delta t_{log} >170.6 \mu s/m$, confirmed by well testing), and (3) zones of enhanced secondary clay alteration resulting from karst-suffosion processes ($V_p/V_s >2.2$, elastic bulk modulus (K) <20 GPa, 15-25% increase in GR and abnormally low shear modulus (G)). Quantitative discrimination criteria are based on threshold values of elastic parameters (V_p/V_s ratio, acoustic impedances, Young's modulus) and clay content, as well as their temporal variations. The most intensive development of all three anomaly types was recorded in the vicinities of boreholes 1x and 9x, indicating the ongoing progression of secondary geological processes. The results confirm the high diagnostic value of time-lapse borehole geophysics for monitoring engineering-geological hazards in post-mining areas.

Keywords: *Monitoringborehole geophysics, acoustic logging, V_p/V_s ratio, engineering geophysics, suffosion, karst, Verkhnekamskoye deposit*

Поступила в редакцию: 28.05.2026

Принята к публикации: 17.06.2026

ДРОЖЖИ В МИКРОБНЫХ КОНСОРЦИУМАХ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ БИОДЕГРАДАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКОПОЛЛЮТАНТОВ

Ефременко Е.Н., *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Степанов Н.А., *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Среди микробных деструкторов органических экозагрязнителей особое место занимают дрожжи, способные формировать консорциумы с различными микроорганизмами. В работе проведен анализ наиболее часто встречающихся партнеров дрожжевых клеток в природных микробных консорциумах, а также указаны экополлютанты, деградация которых в загрязненных средах под действием полимикробных биосистем наиболее хорошо изучена. К числу таких экополлютантов относятся углеводороды нефти, микотоксины, фунгициды, красители, синтетические полимеры. В их биодegradации отмечена значимая роль разнообразных дрожжевых ферментных систем. Природный химический состав клеточных стенок дрожжей, а также их способность синтезировать и внутриклеточно накапливать определенные белки и пептиды обеспечивают дрожжи мощным сорбционным потенциалом по отношению к различным тяжелым металлам, отличающим их от других микроорганизмов. Максимальная степень и скорости биодegradации экозагрязнителей, которые присутствуют в водных средах, достигаются под действием консорциумов, содержащих высокие концентрации клеток дрожжей. Особое внимание уделено формированию кворумного ответа у дрожжей и его роли в регуляции свойств, проявляемых клетками в консорциумах. Отмечена возможность регуляции интенсивности развития биопленок и проявления кворума у клеток в консорциумах через регуляцию концентраций специфичных кворумных молекул. Обсуждаются возможности и перспективы конструирования искусственных консорциумов с участием дрожжей. Представленная информация дает понимание роли консорциумов дрожжей в высоко востребованных в современном мире процессах биодegradации органических экополлютантов.

Ключевые слова: кворумный ответ, биокатализаторы, искусственные консорциумы, углеводороды нефти, микотоксины, фунгициды, красители, синтетические полимеры

Введение

Сегодня несоблюдение существующих требований к обеспечению безопасного ведения сельского хозяйства и хранения различных отходов, нарушения технологических циклов в активно реализуемых промышленных процессах, а также техногенные аварии и террористические акты являются основными причинами появляющихся загрязнений почвенных и водных объектов окружающей среды различными экополлютантами. Сама природа при этом подсказывает наиболее действенные подходы к преодолению возникающих экологических проблем, выдвигая на передний план тех участников экосистем, которые способны осуществлять детоксификацию и эффективную очистку загрязненных сред от экополлютантов и их смесей. Как показывает анализ постоянно накапливающейся информации о результатах научных и практических исследований в разных странах мира, наиболее успешными участниками процессов, направленных на решение экологических проблем, оказываются консорциумы микроорганизмов [1-3]. Известно, что, в соответствии с принципом эмерджентности, живые объекты при формировании

системных образований приобретают качественно новые характеристики, которые отсутствуют у отдельных компонентов этих биосистем, и новые свойства проявляются только в результате их взаимодействия и системной интеграции [4-6]. Устойчивость в проявлении новых свойств часто достигается за счет увеличения плотности клеточных популяций и проявления микроорганизмами «чувства кворума» (Quorum sensing), которое трактуется как «мудрость толпы» [7]. При этом проявление чувства кворума оказалось запрограммированным в геноме клеток разных микроорганизмов (бактерий, мицелиальных грибов, дрожжей, микроводорослей, архей), которые могут сосуществовать в качестве симбионтов в различных экосистемах [8-12].

Разнообразные формы сосуществования микроорганизмов, способных осуществлять разложение различных загрязнителей, в последнее время привлекают к себе всё больший интерес с научной и практической точек зрения, поскольку гетерогенный состав таких микробных сообществ позволяет сочетать в себе метаболические потенциалы участников и при тесном их взаимодействии приводить к улучшению известных и появлению новых свойств [13-16]. Следует отметить, что очень часто объектами исследования в таких сообществах становятся именно бактериальные клетки, обладающие самым широким спектром биохимических путей трансформации и биodeградации экополлютантов [17-20], но целью этого обзора стал анализ текущего состояния научных исследований микробных природных и искусственных консорциумов, в которые входят клетки дрожжей, способствующих снижению уровня загрязнения различных сред.

Разнообразие партнеров для дрожжей в составе микробных консорциумов и в процессах биodeградации экополлютантов, осуществляемых ими

Наиболее интересными свойствами обладают консорциумы, формирующиеся в естественных условиях окружающей среды и сочетающие в своем составе клетки дрожжей и бактерий, архей, мицелиальных грибов, а также микроводорослей, которые способны сосуществовать и катализировать процессы биodeградации и биоремедиации загрязненных участков почв и водных источников (Рис. 1).

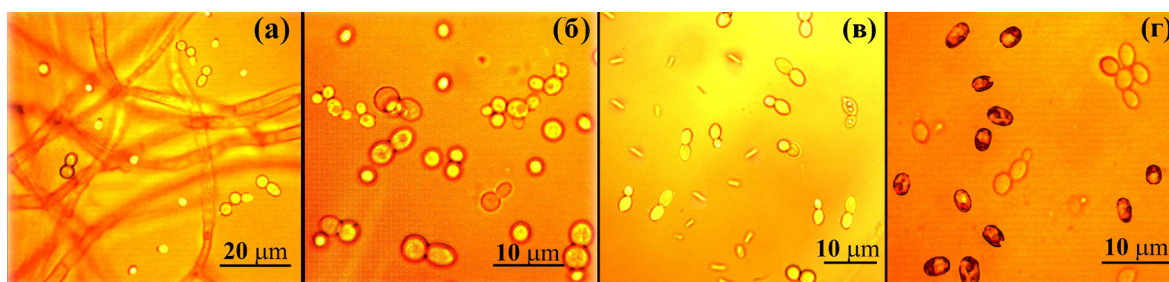


Рис. 1. Микрофотографии суспензионных консорциумов дрожжей *S. cerevisia* с мицелиальным грибом *Aspergillus niger* (а), с дрожжами *Pachysolen tannophilus* (б), с бактериями *Komagataeibacter xylinus* и с клетками микроводоросли *Tetraselmis suecica* (г)

Установлено, что такие природные консорциумы могут менять свой состав в зависимости от условий окружающей среды, что приводит к появлению новых взаимодействий внутри микробного сообщества и внешне проявляемых характеристик. Примером тому служат консорциумы, выделенные недавно из загрязненных нефтью участков почвы. Исследователями были идентифицированы в общей сложности

30 различных консорциумов, 16 из которых (дрожжи с грибами и бактериям), оказались наиболее эффективными в биодеградациии углеводородов нефти [21]. Дрожжи родов *Candida* и *Yarrowia* оказались способны к деградации углеводородов нефти благодаря активности ключевых внутриклеточных ферментов (цитохрома P450, эпоксидгидролазы и глутатион-S-трансферазы), а также своей способности синтезировать биосурфактанты, повышающие биодоступность гидрофобных субстратов для клеток [22].

Показано, что консорциумы дрожжей и микроводорослей часто формируются при очистке сельскохозяйственных, бытовых и пищевых сточных вод [23]. При этом микроводоросли стимулируют метаболизм дрожжей за счет потребления углекислого газа, выделяемого ими, и фотосинтетического накопления в среде кислорода, который используется дрожжами для ассимиляции углеродных субстратов и накопления биомассы. Установлено, что дрожжи по сравнению с микроводорослями в таких консорциумах способны гораздо быстрее снижать концентрации органических загрязнителей в составе сточных вод. В числе партнеров для дрожжей (*Barnettomyza californica*, *Cyberlindnera subsufficiens*, *Candida thasaenensis*, *Candida goslingica*) в таких консорциумах чаще всего встречаются микроводоросли *Scenedesmus sp.* [24].

При изучении состава микробных консорциумов, формирующихся на очистных сооружениях, перерабатывающих биофармацевтические, целлюлозно-бумажные и муниципальные сточные воды, были выделены клетки дрожжей, принадлежащих к более 20 различным родам, которые присутствовали в составе аэробного ила в концентрациях, достигающих 10^5 клеток/г. В наибольших концентрациях в таких консорциумах присутствовали дрожжи – представители родов *Rhodotorula*, *Candida*, *Trichosporon* и *Pichia* [25]. Однако клетки дрожжей также могут присутствовать в составе метаногенных анаэробных илов вместе с бактериями, археями и некоторыми мицелиальными грибами [26]. Показано, что при очистке сточных вод с высоким содержанием солей могут формироваться микробные консорциумы, в которых при доминировании бактерий родов *Pseudomonas* и *Paracoccus* обязательными участниками могут быть галотолерантные дрожжи рода *Meyerozyma* [27]. Есть мнение, что консорциумы, состоящие только из клеток дрожжей родов *Saccharomyces*, *Candida*, *Barnettozyma*, *Wickerhamomyces*, *Debaryomyces*, *Hamamotoa*, *Meyerozyma*, *Sugiyamaellas*, *Thermomyces*, *Pichia*, *Scheffersomyces* и *Pachisolens*, имеют широкое распространение в природе, а наиболее хорошо изученными среди них являются те, что участвуют в процессах ферментации различных углеводсодержащих сред [28-31]. Исследования дрожжей, активно участвующих в конверсии различных сахаров в природных условиях, позволяют улучшить промышленные ферментационные процессы и прийти к пониманию механизмов, управляющих динамикой популяций в составе консорциумов и раскрывающих их суммарный генетический потенциал для создания новых видов продукции или использования субстратов, содержащих не глюкозу, а ксилозу, глицерин и др. [32-34]. Эти знания используются также для целенаправленного создания искусственных вариантов дрожжевых консорциумов, значительно улучшающих так называемые «этанольные» производственные процессы, использующие гидролизаты крахмало-, целлюлозо- и гемицеллюлозосодержащего сырья [28, 35, 36]. Из-за многокомпонентного состава таких сред участие в процессах их конверсии нескольких видов дрожжей оказывается целесообразным и более эффективным, чем действия одной дрожжевой культуры.

Анализ функционирования дрожжевых штаммов именно в составе консорциумов и изучение зависимости их способности продуцировать этанол в таких условиях остаются актуальными и сегодня [31].

Необходимо отметить, что в основе формирования микробных консорциумов с участием дрожжевых клеток лежат не только метаболические взаимодействия, но и непосредственные межклеточные контакты, реализуемые через механизмы биосорбции и адгезии [37]. Эти взаимодействия происходят благодаря наличию на поверхности клеток функциональных групп, которые включают карбоксильные, гидроксильные, amino- и фосфатные группы. Состав этих групп, как правило, оказывается типичным для определенного микроорганизма, но зависит от плотности популяции клеток дрожжей. Установлено, что в консорциумах дрожжи могут изменять свою морфологию, переходя к нитевидной форме клеток и синтезу белков – адгезинов, необходимых для их присоединения к различным поверхностям [38].

Для дрожжей, существующих в составе консорциумов, также установлено, что они способны эффективно выполнять роль биосорбентов экополлютантов, улучшающих их последующую метаболизацию или улучшающих условия безопасного существования партнеров дрожжей по консорциуму [39]. Этому способствует клеточная стенка дрожжей, содержащая повышенную в сравнении с бактериальными клетками суммарную концентрацию карбоксильных, amino- и фосфатных групп, которые могут принимать активное участие в биосорбции молекул загрязнителей [40].

Показано, что дрожжи способны эффективно адсорбировать широкий спектр загрязняющих веществ [39]. Наиболее часто они выступают в качестве экобиосорбентов для тяжелых металлов, присутствующих в загрязненных сточных водах. Их участие в подобных процессах предопределяется не только биохимическим составом поверхности клеток, но и быстрой скоростью накопления биомассы этих клеток в аэробных условиях [41, 42]. При этом среди тяжелых металлов, сорбируемых клетками дрожжей, находящихся в составе консорциумов, были выявлены медь, ртуть [43], свинец [44], хром, кадмий [45], уран [46].

Дрожжи при этом могут не только накапливать тяжелые металлы при их экспозиции в растворах с концентрацией до 300 мМ и сохранять жизнеспособность, но и использовать эти металлы для их включения во вновь синтезируемые дрожжами внутриклеточные металл-органические наночастицы. При этом тяжелые металлы образуют комплексы с внутриклеточными металлотионеинами и глутатионом, синтезируемыми дрожжами в повышенных концентрациях по сравнению с другими микроорганизмами. Такие формирующиеся металлопептидные комплексы, как показывают проведенные исследования, способны проявлять каталитические характеристики, эффективные в процессах фотокаталитического окисления различных экозагрязнителей [47].

Известно, что помимо тяжелых металлов дрожжи способны активно сорбировать микотоксины, синтезируемые мицелиальными грибами, поражающими сырье и продукцию пищевой промышленности [48].

Способствуя биоразложению и детоксикации микотоксинов, дрожжи не только участвуют в их биосорбции, но также используют свои внутриклеточные ферментные системы, в состав которых входят монооксигеназы, эпоксидгидролазы,

глутатион-S-трансфераза и другие ферменты, трансформирующие токсины мицелиальных грибов в безопасные продукты метаболической конверсии [49].

Установлено, что дрожжи, *Saccharomyces cerevisiae*, *Sugiyamaella novakii*, *Kluyveromyces marxianus*, *Pichia kudriavzevii*, *Schizosaccharomyces japonicus* могут играть ключевую роль в повышении безопасности и качества кормов для животных, связывая компонентами клеточной стенки (β -d-глюканами и маннопротеинами) различные микотоксины, продуцируемые мицелиальными грибами, поражающими сельскохозяйственную продукцию, и снижая их биодоступность [50, 51]. В частности, были продемонстрированы удаление из сельскохозяйственного сырья и нейтрализация цитотоксичности клетками дрожжей следующих микотоксинов: токсина Т-2, афлатоксина В1 [52; 53], фумонизина В1 [54], диоксиниваленола [55] и зеараленона [56].

Такие свойства дрожжевых клеток способствуют не только детоксикации самих сред, но и пролонгированному функционированию других микроорганизмов, в частности, бактерий, которые находятся с ними в совместных консорциумах [57]. Так, микотоксин патулин, содержащий в своей структуре лактонное кольцо, имитирующий лактон-содержащие молекулы кворумного ответа у бактерий и подавляющий его формирование у них, был нейтрализован дрожжами *Meyerozyma guilliermondii* на 93% в течение 2 суток [58].

Помимо микотоксинов, установлена возможность адсорбции и деградации ряда пестицидов отдельными штаммами дрожжей *S. cerevisiae*, а также дрожжами, не принадлежащими к роду *Saccharomyces* (*Metschnikowia pulcherrima*, *M. fructicola*, *M. chrysoperlae*, *M. zizyphicola*, *Starmerella bacillaris*, *Torulaspora delbrueckii*, *Lachancea thermotolerans*, *Pichia* sp.), участвующими в функционировании дрожжевых консорциумов в процессах спиртовой ферментации различного исходного сырья, выращенного с применением этих пестицидов [52, 59]. В частности, была установлена детоксикация клетками дрожжей таких фунгицидов, как пириметанил, ципродинил, процимидон, зоксамид и циазофамид [60, 61], инсектицида карбофурана и гербицида глифосата [62]. При этом наиболее активными в таких биodeградационных процессах оказались консорциумы, состоящие не только из штаммов *S. cerevisiae*, но и из дрожжей *Trichosporon cutaneum* и *Candida tropicalis*.

Еще одним важным типом экополлютантов, в удалении которых активно участвуют дрожжевые консорциумы за счет своей способности к биосорбции и ферментативной биodeградации различных органических соединений, являются красители, появляющиеся в сточных водах [63]. Так, дрожжевые клетки *S. cerevisiae* были применены в качестве биосорбента для удаления красителя метилового оранжевого (50 мг/л) с эффективностью 96,5 % [64]. Дрожжи *Sterigmatomyces halophilus* были наиболее эффективными в биосорбции и деградации на 100% красителя реактивного черного (50 мг/л) в течение 24 ч. [65], тогда как дрожжи *Debaryomyces hansenii* обеспечивали 90% биodeградацию красителей реактивного синего и реактивного красного при их концентрации 100 мг/л в обрабатываемых средах [66]. Для дрожжей *Pichia occidentalis* была установлена максимальная биodeградационная активность по отношению к различным азокрасителям, в том числе красителю кислотному красному, разложение которого проходило через расщепление нафталин-амидиновой связи, восстановительное дезаминирование, окислительное дезаминирование, десульфуризацию, образование разомкнутого цикла гидроксизамещенного нафталина

с последующим включением образующихся продуктов в цикл трикарбоновых кислот. При этом было подтверждено увеличение активности таких внутриклеточных ферментов дрожжей, как Mn-пероксидазы и лакказы в 1,37 и 1,16 раза соответственно [67].

Объединение дрожжевых клеток, имеющих преференции в осуществлении биodeградации разных красителей, в консорциумы позволяет достигать максимального эффекта в очистке стоков с текстильных предприятий [68]. Так консорциум, состоящий из трех дрожжевых культур, демонстрировал возможность быстрого (в течение 6-12 ч) снижения концентрации красителей, содержащихся в реальных текстильных сточных водах в концентрации 100 мг/л, на 90-100% [69]. Консорциум, состоящий из двух дрожжевых культур (*Sterigmatomyces halophilus* и *Meyerozyma guilliermondii*), успешно справлялся со сложной смесью азокрасителей, в которой присутствовали реактивный черный, кислотнo-оранжевый, реактивный зеленый, реактивный желтый и атлантический черный (все – в концентрации по 50 мг/л) [70]. В числе ключевых ферментов дрожжей, участвующих в формировании консорциумов и деградирующих различные красители, разными исследователями были выявлены одинаковые ферменты – оксидазы и редуктазы, в частности, фенолредуктаза, азоредуктаза, тирозиназа, Mn-пероксидаза и лакказа.

Было показано синергическое взаимодействие между клетками дрожжей *Rhodotorula sp.* в консорциуме с бактериями *Raoultella planticola* и *Staphylococcus xylosus* в процессе биodeградации метиленового синего [71]. Следует отметить, что в ряде указанных выше исследований с дрожжевыми консорциумами, которые использовались для деградации промышленных красителей, контролировались фито- и цитотоксичность образующихся продуктов и был подтвержден нетоксичный характер сред, получаемых после разложения этих экополлютантов.

Таким образом, сочетание способностей к биосорбции и ферментативной деградации различных экополлютантов, подтверждаемое в современных исследованиях, повышает актуальность использования дрожжей и их различных по составу консорциумов для создания высокоэффективных биокатализаторов, пригодных для детоксификации загрязнённых сред. Изучение механизмов межклеточного взаимодействия и изменений характеристик клеток дрожжей при определённых условиях их культивирования, выявленных в исследованиях природных консорциумов, является критически важным для использования в разработках искусственных консорциумов.

Кворумный ответ клеток дрожжей в регуляции свойств консорциумов

Для интенсификации различных биотехнологических процессов используются высококонцентрированные популяции клеток различных микроорганизмов [8]. Сегодня хорошо известно, что плотность клеток контролируется системами Quorum sensing (QS). QS представляет собой скоординированный, кооперативный ответ клеток, генерируемый глобальной системой регуляции экспрессии генов. При этом происходит формирование такого ответа клеток, который позволяет клеткам общаться и координировать своё «коллективное» поведение. Ответ запускается путем синтеза кворумных молекул, которые синтезируются клетками наряду с другими метаболитами. Когда концентрация клеток достигает порогового значения, клетки реагируют на эти сигналы и осуществляют обратную связь для регулирования своей морфологии.

Молекулы кворума в микробных клетках связаны с регуляцией производства вторичных метаболитов, симбиозом, патогенезом, образованием биопленок [9].

На сегодняшний день хорошо изучены молекулы QS у дрожжей, представляющие собой различные спирты: фарнезол, тирозол, 2-фенилэтанол, триптофол и другие [72]. Под их действием дрожжи могут претерпевать морфологические изменения, переходя к удлинённым формам, их агрегации, появлению псевдогиф и образованию биопленок (Рис. 2).

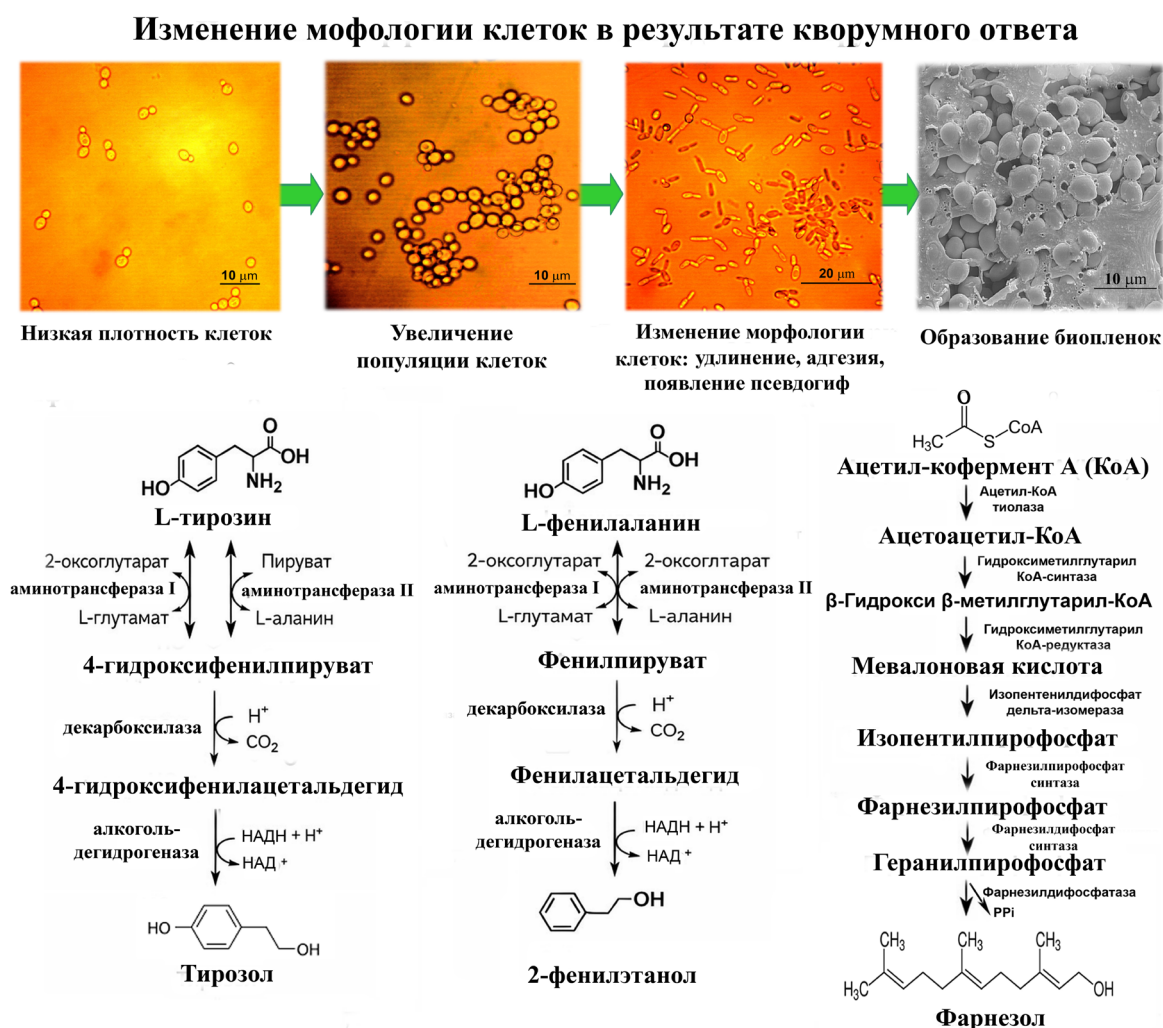


Рис. 2. Изменение морфологии клеток дрожжей под действием кворумных молекул и основные пути их биосинтеза

Наиболее хорошо изучены такие изменения у клеток дрожжей *Candida*. Фарнезол у этих видов дрожжей предотвращает изменение морфологии клеток из дрожжевой формы в мицелиальную, тогда как тирозол ускоряет развитие гиф и формирование биопленок [73].

Дрожжи рода *Saccharomyces* используют 2-фенилэтанол, триптофол и тирозол для контроля морфогенетических изменений в условиях азотного голодания [74]. Эти спирты регулируют морфологический переход дрожжей от классической клеточной формы к нитевидной. При этом 2-фенилэтанол и триптофол влияют на активацию генов, участвующих в клеточной адгезии и образовании биопленки [75]. Показано,

что максимальный уровень накопления 2-фенилэтанола достигается в стационарной фазе роста клеток, дефицит в среде именно источников азота повышает уровень синтеза этого спирта дрожжами.

Триптофол вызывает флокуляцию клеток дрожжей *S. cerevisiae*, которая является проявлением защитного механизма, обеспечивающего физическое экранирование внутренних слоев клеток от воздействия негативных факторов внешней среды [76].

Фарнезол синтезируется дрожжами в результате ферментативного дефосфорилирования фарнезилпирофосфата (Рис. 2), и его синтез не зависит от источника углерода или азота [77]. Помимо изменения морфологии клеток, фарнезол влияет на биохимические пути метаболизма дрожжей, связанные с биосинтезом стиролов как компонентов клеточных стенок, или регулирует запуск апоптоза за счёт накопления активных форм кислорода. Влияние фарнезола на клетки дрожжей зависит от его концентрации: при высоких концентрациях (200-300 мкМ) наблюдается ингибирование роста клеток дрожжей путем нарушения митохондриальной цепи переноса электронов, что сопровождается высвобождением активных форм кислорода, приводящим к апоптозу. Однако при снижении концентрации фарнезола до 40 мкМ происходит индукция синтеза каталазы и защита клеток от окислительного стресса и апоптоза [78].

Биосинтез тирозола как молекулы QS дрожжами происходит преимущественно за счет катаболизма тирозина (Рис. 2) и может быть повышен при введении в среду этой аминокислоты [77]. Потребность в таком управлении поведением дрожжевых клеток может возникать при их функционировании в консорциумах, используемых в различных биотехнологических процессах, в том числе при деградации различных экополлютантов, и способствовать увеличению общей производительности процессов. Было показано, что тирозол (50 мкМ) применим для целенаправленного повышения плотности популяции клеток дрожжей *Candida tropicalis* (до 48 раз) и увеличения их толерантности к разным металлам (2 мМ Zn^{+2} , 5 мМ Mn^{+2} , 2 мМ Co^{+2} и 1 мМ Cu^{+2}) вследствие того, что тирозол усиливает репликацию ДНК и синтез металл-связывающих пептидов и белков [79].

При очистке сточных вод было показано, что высококонцентрированные популяции клеток *Candida tropicalis* характеризуются лучшей флокуляцией и способностью к осаждению, что способствует их быстрому отделению от обрабатываемой ими среды. Этому поспособствовал фенилэтанол, представляющий собой молекулу QS, меняющую морфологию и метаболизм дрожжей. Он был обнаружен в числе внеклеточных метаболитов в сточной среде, и его концентрация увеличивалась до 300 мг/л с повышением плотности клеток [10]. Таким образом, регулируя концентрацию клеток и молекул QS, можно повысить эффективность процесса очистки сточных вод, содержащих высокие концентрации загрязняющих веществ [80]. Экспериментально этот вывод был подтверждён исследованиями по использованию дрожжей для очистки сточных вод, загрязненных углеводородами нефти [81].

В ряде биотехнологических процессов с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* [74, 76], *Torulaspora delbrueckii* [82], *Wickerhamomyces anomalus*, *Candida glabrata*, *C. tropicalis* [83], *Torulaspora delbrueckii*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Hanseniaspora uvarum* и *Starmerella bacillaris* [84] была подтверждена возможность повышения выхода этанола за счет внесения молекул QS (триптофола и 2-фенилэтанола) в концентрации 0,05-0,2 вес% в среды с клетками [85]. Особенно это было эффективно

при использовании в качестве субстратов различных пищевых отходов, для которых требовался предгидролиз. Оказалось, что добавление в ферментационные среды 25-50 мкМ тирозола и фенилэтанола значительно усиливает биосинтез гидролитических ферментов, расщепляющих присутствующие субстраты. Отмечено, что расширение за счет этого спектра биодоступных питательных веществ в средах с дрожжами в присутствии их кворумных молекул способствует формированию гетерогенных консорциумов дрожжей с бактериями родов *Limosilactobacillus*, *Weissella*, *Pediococcus*, *Clostridium* и *Bacillus* [86]. Установлено, что не только синтезу гидролаз способствует присутствие молекул кворума, но и белков адгезии (адгезинов) – гликопротеинов в составе клеточных стенок дрожжей, которые участвуют во взаимодействиях клеток дрожжей с разными поверхностями, друг с другом (флокуляция и филаментация) и другими клетками микроорганизмов.

На примере клеток *C. albicans* подтверждена способность дрожжей формировать смешанные микробные биопленки на различных тканях животных, медицинских имплантах, изделиях из различных материалов (металлов и пластиков) [87, 88]. В составе этих биопленок, а также биопленок, сформированных дрожжами *S. cerevisiae*, подтверждено присутствие фенилэтанола, синтез которого зависит от появления при истощении источника углерода циклического аденозинмонофосфата как трофического фактора [9]. Интересно отметить, что именно разные соотношения тирозола и фарнезола, накапливающиеся в среде с дрожжами по мере роста их численности, на разных стадиях формирования биопленок вызывают переход клеток от традиционных дрожжевых форм к гифам и наоборот. Стимуляция филаментации тирозолом может быть нивелирована присутствием фарнезола, который действует как ключевой сигнал на поздних стадиях развития биопленки и позволяет увеличить популяцию единичных клеток дрожжей. Например, концентрации фарнезола выше 100 мкМ блокируют морфологический переход у дрожжей к гифальной форме. Это явление особенно важно для борьбы со смешанными полимикробными биопленками, поскольку бактерии в таких биопленках преимущественно связываются через адгезины с гифальными филаментами дрожжей [89].

Следует отметить, что среди современных эффективных средств подавления роста и развития дрожжевых клеток, в том числе в составе полимикробных биопленок, наибольшее внимание к себе привлекают как раз те подходы, что основаны на использовании манипуляций с молекулами QS. Их введение в среды с дрожжами и их консорциумами в высоких концентрациях в сочетании с антимикробными агентами позволяет регулировать формирование биопленок, устойчивых к воздействию различных неблагоприятных факторов, и подавлять их дальнейшее метаболическое функционирование. Было изучено влияние самого фарнезола и его комбинаций с антибиотиками (оксациллином, цефокситином или канамицином) на смешанные биопленки, сформированные патогенами *Candida albicans* и *Staphylococcus aureus*. Минимальная ингибирующая концентрация фарнезола для смешанных биопленок дрожжей *C. albicans* и бактерий *S. aureus* составила 250 мкМ, а применение фарнезола в концентрации 300 мкМ в композиции с антибиотиком (2 мг/мл) обеспечивало гарантированное снижение жизнеспособности клеток в биопленках на 80% [89]. Также было установлено, что фарнезол, воздействуя на смешанные консорциумы с дрожжами, проявляет антибактериальную активность в отношении некоторых грамположительных клеток бактерий, повреждая целостность их цитоплазматической

мембраны [90]. Применение фарнезола одновременно с натамицином (0,6 ммоль/л) и натамицином (0,01 ммоль/л) показало свою эффективность против полимикробных биопленок, состоящих из дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa*, *Candida tropicalis*, *C. krusei* или *C. kefir* и бактерий *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* или *Escherichia coli*, образующихся на ультрафильтрационных мембранах и поверхностях из нержавеющей стали на линиях по производству яблочного сока. Применение такой комбинации молекул QS с антимикробными агентами приводило к угнетению развития нитчатых форм дрожжей, расслоению матрикса биоплёнки и снижению численности клеток бактерий [91]. Комбинация фарнезола с карвакролом была эффективна против биопленок *C. albicans* и *Providencia stuartii*, *Staphylococcus aureus* [92].

Еще один подход к снижению стабильности популяций дрожжей и их консорциумов основан на применении ферментов, разрушающих кворумные молекулы дрожжей, при их сочетании с антимикробными агентами. В этом случае эффект подавляющего воздействия на дрожжи основан не на повышении, а на резком биокаталитическом снижении концентрации молекул QS в среде с клетками. Наиболее эффективными в этом случае оказались различные гидролазы [90, 93-95].

Таким образом, манипуляции с молекулами QS в биокаталитических системах на основе дрожжевых клеток делают возможным формирование биокатализаторов с улучшенными характеристиками, обеспечивающими эффективное проведение биотехнологических процессов и решение экологических задач за счет снижения уровня экопеллютантов. А с другой стороны, возможно целенаправленное снижение негативных эффектов, связанных с образованием полимикробных биопленок, в том числе патогенных, с участием клеток дрожжей.

Искусственные консорциумы с участием дрожжей и их потенциал в решении экоориентированных задач

Целенаправленное конструирование искусственных микробных консорциумов сегодня является одним из активно развивающихся направлений так называемой «синтетической биологии», поскольку предполагает комбинирование разных микроорганизмов в такие биосистемы, в которых клетки способны переходить в устойчивые взаимодействия и эффективное сосуществование, обеспечивая максимальный эффект при их использовании в биотехнологических и экологически ориентированных процессах [96]. Искусственные консорциумы, включающие клетки микроорганизмов из разных царств, особенно привлекательны с научной и практической точки зрения, благодаря возможности расширения их суммарного метаболического потенциала [97-98].

Наиболее привлекательные характеристики искусственных консорциумов микроорганизмов, проявляющиеся при использовании кворумных биосистем, были установлены преимущественно при изучении бактериальных клеток [99], но полностью могут быть отнесены к дрожжесодержащим вариантам [8, 100]:

- простота в использовании, воспроизводимость композиций консорциумов;
- возможность введения максимальной целенаправленной метаболической активности в клетки консорциумов, которые могут быть улучшены за счет генетической модификации клеток;
- целенаправленное изменение соотношения концентраций клеток в консорциуме для регулирования скорости сопутствующих биохимических процессов, катализируемых клетками;

– устойчивое функционирование создаваемых консорциумов, которое сопровождается повышением степени конверсии исходных субстратов, в том числе токсичных соединений.

Растущий интерес к дрожжам как части искусственных консорциумов обусловлен тем, что они способны:

– участвовать в конверсии различных экозагрязнителей в аэробных и анаэробных условиях, в том числе в средах с низкими значениями pH [96, 101].

– использовать для деградации различных субстратов широкий спектр гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов [96].

Безусловно, для эффективного функционирования синтетических микробных консорциумов важно прогнозировать возможные типы взаимодействий всех микроорганизмов, входящих в искусственно создаваемые биосистемы. Чаще всего в основе этих взаимодействий лежит мутуализм или конкуренция [96, 99]. Мутуализм предполагает, что совместно культивируемые микроорганизмы оказывают благоприятное влияние друг на друга, при этом происходит стабилизация состава искусственных консорциумов, но только при определенной плотности клеток.

В случае конкуренции за субстрат участники консорциума могут выделять в среду метаболиты, негативно влияющие на других участников консорциума (органические кислоты, токсины, антимикробные пептиды, ферменты и др.). Как правило, эти процессы регулируются молекулами QS и условиями его формирования, которые могут использоваться для контроля или управления экспрессией определенных генов, контроля состава консорциумов и обеспечения межклеточных связей между определенными участниками консорциумов.

Иммобилизация клеток также может решить проблемы стабильности микробных консорциумов, поскольку в ограниченном пространстве клеточная коммуникация может быть более активной, что позитивно влияет на скорости биоремедиационных процессов. При этом включение клеток в гелевые матрицы имитирует состояние клеток в биопленках, к формированию которых стремятся участники искусственных консорциумов [96; 102, 103].

Консорциумы микроорганизмов применяются для выделения наиболее активных штаммов из различных природных источников, которые далее часто используются для составления новых консорциумов и разложения различных экополлютантов, в том числе труднобиodeградируемых [104]. Наиболее часто среди вводимых в искусственные консорциумы клеток дрожжей можно увидеть клетки *S. cerevisiae*, *Pichia pastoris*, *Yarrowia lipolytica* и *Candida parapsilosis* [105].

В ряде случаев в искусственные консорциумы включаются не только природные штаммы дрожжей, но и генетически модифицированные клетки. Это позволяет расширить спектр экополлютантов, которые могут быть подвергнуты деградации применяемыми консорциумами клеток. Так, в искусственный консорциум, сконструированный на основе дрожжей родов *Candida*, *Cryptococcus*, *Pichia*, *Rhodosporidium*, *Rhodotorula*, которые считаются потенциальными деструкторами алифатических и полиароматических углеводов нефти (ПАУ) [22, 106], были введены дрожжи *Debaryomyces hansenii* с генетически улучшенной биodeградацией бенз[а]пирена [107, 108]. При этом в комбинации тех же дрожжей с бактериями *Pseudomonas putida* и *Bacillus persicus* в составе искусственного консорциума было продемонстрировано значительное повышение эффективности деградации пирена

(до 78%). Оказалось, что дрожжи выделяли в среду рамнолипид, который выполнял роль биосурфактанта и обеспечивал повышение биодоступности пирена [109]. Кроме того, было установлено, что именно при участии ферментов дрожжей (цитохрома P450, эпоксидгидролазы и глутатион-S-трансферазы) происходила успешная деградация ПАУ в загрязненных средах под действием искусственных консорциумов [110]. Было обнаружено, что дрожжи окисляют ПАУ посредством метаболизма или ко-метаболизма. Кроме того, было установлено, что некоторые изоляты дрожжей обладают более чем одним способом разложения ПАУ.

В ряде случаев при использовании именно искусственных консорциумов, содержащих в своем составе клетки дрожжей, были достигнуты более высокие результаты по деградации ряда экополлютантов в сравнении с отдельными дрожжевыми культурами или природными консорциумами. В частности, это относится к биодеструкции синтетических полимеров. Известно, что дрожжи, принадлежащие к родам *Vanrija*, *Rhodotorula*, *Meyerozyma*, *Candida*, способны осуществлять биodeградацию полиэтилентерефталата (на 10%) и полиэтилена (на 14%) [111], однако более эффективной деградации этих синтетических полимеров можно добиться под действием специально составленных синтетических микробных консорциумов. Например, для деградации полиэтилена был собран консорциум из трех штаммов дрожжей: *Sterigmatomyces halophilus*, *Meyerozyma guilliermondii* и *M. caribbica* [70]. Он обеспечивал снижение прочности полимера на 63.4% и потерю массы полимером на 33.2% в течение 45 суток. Дрожжи были способны к синтезу ферментов (Mn-пероксидазы и лакказы), активность которых возрастала именно в таком искусственном консорциуме [112]. Развитие процесса биодеструкции сопровождалось активным накоплением биомассы дрожжевых клеток-деструкторов и продуктов метаболизма полимера, среди которых были идентифицированы алканы, алкены, карбоновые кислоты, альдегиды, эфиры и спирты.

Достичь 22%-ной деградации полиэтилена в течение 56 суток удалось с использованием другого искусственного консорциума, в который были введены дрожжи *Candida parapsilosis*, бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и грибы родов *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Alternaria*, *Penicillium* и *Trichoderma*.

Заключение

Анализ основных направлений развития исследований консорциумов микроорганизмов, в состав которых входят дрожжи, показывает, что прогноз современных исследователей [113] связывает их в ближайшие годы с разработкой новых синтетических вариантов полимикробных биосистем, которые позволят не только осуществлять биodeградацию органических экополлютантов, но и совмещать этот процесс с получением новых ценных продуктов: металлосодержащих катализаторов [47], биотоплива [101], различных биологически активных веществ [97]. При этом учёт необходимости использования в составе консорциумов высоко концентрированных популяций клеток, обеспечивающих стабильность функционирования таких биосистем, как ожидается, будет стоять на переднем плане этих разработок. Перспективным представляется использование искусственно иммобилизованных форм консорциумов, включающих дрожжевые клетки, или использование характерной для дрожжей природной способности к автоагрегации клеток [114], которая позволяет легко и быстро отделять формируемые ими хлопьевидные агрегаты после очистки сточных вод от экополлютантов для многократного применения таких биосистем.

Библиографический список

1. *Krishna Raj C., Siranjeevi R., Susmitha, R., Sameera Shabnum S., Saravanan A., Vickram A.S., Chopra H.* Bioremediation in action: Recent progress, challenges, and future directions for environmental restoration // *Biodegradation*. 2026. – Vol. 37. – Article 9. DOI: 10.1007/s10532-025-10232-3.
2. *Omar A.N., Chirnside A.E.M., Kniel K.E.* Exploring novel fungal bioremediation treatments to inhibit pollutants and microbial hazards associated with untreated biological soil amendments of animal origin // *Microorganisms*. – 2025. – Vol. 13. – Article 2847. DOI: 10.3390/microorganisms13122847.
3. *Efremenko E.* Editorial for special issue “Biotechnology for environmental remediation” // *Microorganisms*. – 2026. – Vol.14. – Article 283. DOI: 10.3390/microorganisms14020283.
4. *Qattan S.Y.A.* Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants // *Environmental Sciences Europe*. – 2025. – Vol. 37. – Article 85. DOI: 10.1186/s12302-025-01103-y.
5. *Senko O., Stepanov N., Maslova O., Gladchenko M., Gaydamaka S., Aslanli A., Efremenko E.* Artificially obtained humic-like substances from chicken manure and symbionts in vitro and in situ improvement of oil degradation in soil // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2024. – Vol. 17. – Article 300. DOI: 10.1007/s12517-024-12105-0.
6. *Salini A., Zuliani L., Gonnelli P.M., Orlando M., Odoardo A., Ragno D., Aulitto M., Zacccone C., Fusco S.* Plastic-degrading microbial consortia from a wastewater treatment plant // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2024. – Vol. 25. – Article 12747. DOI: 10.3390/ijms252312747.
7. *Moreno-Gómez S., Hochberg M.E., van Doorn G.S.* Quorum sensing as a mechanism to harness the wisdom of the crowds // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Article 3415. DOI: 10.1038/s41467-023-37950-7.
8. *Efremenko E., Senko O., Stepanov N., Aslanli A., Maslova O., Lyagin I.* Quorum sensing as a trigger that improves characteristics of microbial biocatalysts // *Microorganisms*. – 2023. – Vol. 11. – Article 1395. DOI: 10.3390/microorganisms11061395.
9. *Tian X., Ding H., Ke W., Wang L.* Quorum sensing in fungal species // *Annual Review of Microbiology*. – 2021. – Vol. 75. – P. 449–469. DOI: 10.1146/annurev-micro-060321-045510.
10. *Sun J., Sun H., Lv W., Zhang Q., Wan P., Jiang L., Zhong Y.* Quorum sensing mediates yeast cell morphology to improve settleability: Implication for wastewater treatment // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – Article 105817. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105817.
11. *Pawlikowska-Warych M., Tokarz-Deptuła B., Czupryńska P., Deptuła W.* Biofilm and quorum sensing in archaea // *Acta Biologica*. – 2019. – Vol. 26. – P.35–44. DOI: 10.18276/AB.2019.26-04.
12. *Zhou Y., Tang L., Chen D., Li Y., Wu S., Qiao J.* Analysis and engineering of quorum sensing-based communications between bacteria and fungi // *mBio*. – 2026. – Vol. 17. – Article e0383825. DOI: 10.1128/mbio.03838-25.
13. *Maslova O., Senko O., Gladchenko M.A., Gaydamaka S.N., Efremenko E.* Prospects for combined applications of nanostructured catalysts and biocatalysts for elimination of hydrocarbon pollutants // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – Article 5815. DOI: 10.3390/app13095815.
14. *Al-Mur B.A., Pugazhendhi A., Jamal M.T.* Application of integrated extremophilic (halo-alkalophilic) bacterial consortium in the degradation of petroleum hydrocarbons and treatment of petroleum refinery wastewater under extreme condition // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 413. – Article 125351. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125351.
15. *Efremenko E., Senko O., Teplova K., Aslanli A.* Biomass of microalgae and other phototrophic microorganisms: Current trends in regulation of its accumulation and application of immobilized forms // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – Article 12775. DOI: 10.3390/app152312775.
16. *Wang J., Chen X., Sun H., Li X., Lu Q., Qin P., Yang Y., Lai D., Luo L., Peng X., Yang Y., Wu Z.* Accelerated removal and mechanism of tetracycline from water using immobilized bacteria combined with microalgae // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2025. – Vol. 13. – Article 115424. DOI: 10.1016/j.jece.2025.115424.
17. *Krivoruchko A.V., Kuyukina M.S., Ivshina I.B.* Advanced *Rhodococcus* biocatalysts for environmental biotechnologies // *Catalysts*. – 2019. – Vol. 9. – Article 236. DOI: 1.3390/catal9030236.

18. *Senko O., Maslova O., Aslanli A., Efremenko E.* Impact of perfluorocarbons with gas transport function on growth of phototrophic microorganisms in a free and immobilized state and in consortia with bacteria // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – Article 1868. DOI: 10.3390/app13031868.
19. *Efremenko, E., Senko O., Maslova O., Lyagin I., Aslanli A., Stepanov N.* Destruction of mycotoxins in poultry waste under anaerobic conditions within methanogenesis catalyzed by artificial microbial consortia // *Toxins*. – 2023. Vol. 15. – Article 205. DOI: 10.3390/toxins15030205.
20. *Филимонов И.В., Янковская А.А., Кужелко С.В., Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Голипад А.Н., Колесников Д.П., Ковтун В.А., Холстов В.И., Лягин И.В., Ефременко Е.Н.* Исследования в сфере перспективного использования химико-биологических и медицинских биокаталитических технологий в интересах Вооруженных Сил // *Вестник войск РХБ защиты*. – 2018. – Т. 2. – № 2. – С. 18-50. DOI: 10.35825/2587-5728-2018-2-2-18-50.
21. *Ramdass A.C., Rampersad S.N.* Naturally-occurring microbial consortia for the potential bioremediation of hydrocarbon-polluted sites in Trinidad // *Bioremediation Journal*. – 2023. – Vol. 27. – P. 443-452. DOI: 10.1080/10889868.2022.2043235.
22. *Padilla-Garfias F., Araiza-Villanueva M., Calahorra M., Sánchez N.S., Peña A.* Advances in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by yeasts: A Review // *Microorganisms*. – 2024. – Vol. 12. Article 2484. DOI: 10.3390/microorganisms12122484.
23. *Gururani P., Bhatnagar P., Kumar V., Vlaskin M.S., Grigorenko A.V.* Algal consortiums: A novel and integrated approach for wastewater treatment // *Water*. – 2022. – Vol 14. – Article 3784. DOI: 10.3390/w14223784.
24. *Walls L.E., Velasquez-Orta S.B., Romero-Frasca E., Leary P., Noguez I.Y., Ledesma M.T.O.* Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. // *Biochemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 151. – Article 107319. DOI: 10.1016/j.bej.2019.107319.
25. *Yang Q., Angly F.E., Wang Z., Zhang H.* Wastewater treatment systems harbor specific and diverse yeast communities // *Biochemical Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 58. – P. 168–176. DOI: 10.1016/j.bej.2011.09.012.
26. *Efremenko E., Stepanov N., Senko O. Maslova O., Volikov A., Zhirkova A., Perminova I.* Strategies for variable regulation of methanogenesis efficiency and velocity // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2022. – Vol. 106. – P. 6833–6845. DOI: 10.1007/s00253-022-12148-x.
27. *Wen H., Xiong K., Yang H., Zhang P., Wang X.* Dynamic mechanism of the microbiota of high-salinity organic wastewater with salt-tolerant yeast and its application. // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Article 107377. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107377.
28. *Malik K., Salama E.S., El-Dalatony M.M., Jalalah M., Harraz F.A., Al-Assiri M.S., Li X.* Co-fermentation of immobilized yeasts boosted bioethanol production from pretreated cotton stalk lignocellulosic biomass: Long-term investigation // *Industrial Crops and Products*. – 2021. – Vol. 159. – Article 113122. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.113122.
29. *Belda I, Benitez-Dominguez B, Izquierdo-Gea S, Vila JCC, Ruiz J.* Ecology and evolutionary biology as frameworks to study wine fermentations // *Microbial Biotechnology*. – 2025. – Vol. 18. – Article e70078. DOI: 10.1111/1751-7915.70078.
30. *Benito Á., Calderón F., Benito S.* The influence of non-Saccharomyces species on wine fermentation quality parameters // *Fermentation*. 2019. – Vol. 5. – Article 54. DOI: 10.3390/fermentation5030054.
31. *da Silva E.G., Borges A.S., Maione N.R., Castiglioni G.L., Suarez C.A., Montano I.D.* Fermentation of hemicellulose liquor from Brewer's spent grain using *Scheffersomyces stipitis* and *Pachysolen tannophilus* for production of 2G ethanol and xylitol // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* – 2020. – Vol. 14. – P. 127–137. DOI: 10.1002/bbb.2072.
32. *Ali S.S., Wu J., Xie R., Zhou F., Sun J., Huang M.* Screening and characterizing of xylanolytic and xylose-fermenting yeasts isolated from the wood-feeding termite, *Reticulitermes chinensis* // *PLoS ONE* – 2017. – Vol. 12. – Article e0181141. DOI: 10.1371/journal.pone.0181141.
33. *Ruchala J., Sibirny A.A.* Pentose metabolism and conversion to biofuels and high-value chemicals in yeasts // *FEMS Microbiology Reviews*. – 2022. – Vol. 45. – Article fuaa069. DOI: /10.1093/femsre/fuaa069.

34. *Stepanov N., Efremenko E.* Immobilized cells of *Pachysolen tannophilus* yeast for ethanol production from crude glycerol // *New biotechnology* – 2017. – Vol. 34. – P. 54–58. DOI: 10.1016/j.nbt.2016.05.002.
35. *Chen L., Du J.-L., Zhan Y.-J., Li J.-A., Zuo R.-R., Tian S.* Consolidated bioprocessing for cellulosic ethanol conversion by cellulase–xylanase cell-surfaced yeast consortium // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. – 2018. – Vol. 48. — P. 653–661. DOI: 10.1080/10826068.2018.1487846;
36. *da Silva Fernandes F., de Souza É.S., Carneiro L.M., Alves Silva J.P., de Souza J.V.B., da Silva Batista J.* Current ethanol production requirements for the yeast *Saccharomyces cerevisiae* // *International Journal of Microbiology*. – 2022. – Vol. 2022. – Article 7878830. DOI: 10.1155/2022/7878830.
37. *Kulshrestha A., Gupta P.* Polymicrobial interaction in biofilm: mechanistic insights. // *Pathogens and Disease*. – 2022. – Vol. 80. – Article ftac010. DOI: 10.1093/femspd/ftac010.
38. *Ponde N.O., Lortal L., Ramage G., Naglik J.R., Richardson J.P.* *Candida albicans* biofilms and polymicrobial interactions // *Critical Reviews in Microbiology*. – 2021. – Vol. 47. – P. 91–111. DOI: 10.1080/1040841X.2020.1843400.
39. *Aeini K., Zoghi A., Khosravi-Darani K.* Application of yeasts as pollutant adsorbents // *Current Microbiology*. – 2025. – Vol. 82. – Article 368. DOI: 10.1007/s00284-025-04343-6.
40. *Mohiuddin O.P., Harvey A., Orta Ledesma M.T., Velasquez-Orta S.* Bioremediation of waste by yeast strains // *Electronic Journal of Biotechnology*. – 2024. – Vol. 69. – P. 30–42. DOI: 10.1016/J.EJBT.2024.01.005.
41. *Rahman Z., Singh V.P.* Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27. – P. 27563–27581. DOI: 10.1007/s11356-020-08903-0.
42. *Xie S.* Biosorption of heavy metal ions from contaminated wastewater: an eco-friendly approach // *Green Chemistry Letters and Reviews*. – 2024. – Vol. 17. – Article 2357213. DOI: 10.1080/17518253.2024.2357213.
43. *Aibeche C., Selami N., Zitouni-Haouar F.E.H., Oeunzar K., Addou A., Kaid-Harche M., Djabeur A.* Bioremediation potential and lead removal capacity of heavy metal-tolerant yeasts isolated from Dayet Oum Ghellaz Lake water (northwest of Algeria) // *International Microbiology*. – 2020. – Vol. 25. – P. 61–73. DOI: 10.1007/s10123-021-00191-z.
44. *Gupta N., Arunachalam S.* From consortium design to bioaugmented filters: scalable yeast-based strategies for lead remediation in water systems // *Front Microbiology*. – 2025. – Vol. 16. – Article 1647398. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1647398.
45. *De Rossi A., Rigueto C.V.T., Dettmer A., Colla L.M., Piccin J.S.* Synthesis, characterization, and application of *Saccharomyces cerevisiae*/alginate composites beads for adsorption of heavy metals // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – Article 104009. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104009.
46. *Chen C., Hu J., Wang J.* Uranium biosorption by immobilized active yeast cells entrapped in calcium-alginate-PVA-GO-crosslinked gel beads // *Radiochimica Acta*. – 2020. – Vol. 108. – P. 273–286. DOI: 10.1515/RACT-2019-3150.
47. *Lyagin I., Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O., Maslova O., Efremenko E.* Metal nanomaterials and hydrolytic enzyme-based formulations for improved antifungal activity // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24. – Article 11359. DOI: 10.3390/ijms241411359.
48. *Papp L.A., Horváth E., Peles F., Pócsi I., Miklós I.* Insight into yeast–mycotoxin relations // *Agriculture*. – 2021. – Vol. 11. – Article 1291. DOI: 10.3390/agriculture11121291.
49. *Lyagin I., Efremenko E.* Enzymes for detoxification of various mycotoxins: Origins and mechanisms of catalytic action // *Molecules*. – 2019. – Vol. 24. – Article 2362. DOI: 10.3390/molecules24132362.
50. *Alasmar R., Ul-Hassan Z., Zeidan R., Al-Thani R., Al-Shamary N., Alnaimi H., Migheli Q., Jaoua S.* Isolation of a novel *Kluyveromyces marxianus* strain QKM-4 and evidence of its volatilome production and binding potentialities in the biocontrol of toxigenic fungi and their mycotoxins // *ACS Omega*. – 2020. – Vol. 5. – P. 17637–17645. DOI: /10.1021/acsomega.0c02124.

51. Papp L.A., Adácsi C., Acs-Szabo L., Batta G., Csoma H., Pusztahelyi T., Pócsi I., Miklós I. Co-cultivation of *Schizosaccharomyces japonicus* and *Fusarium graminearum* reveals the biocontrol effect of yeast and its potential genes for detoxification // *Agriculture*. – 2026. – V. 16 – Article 494. DOI: 10.3390/agriculture16050494.
52. Ruchala J., Vasylyshyn R., Wnuk, M. Yeast-based biotechnology for civilian security // *Environmental Microbiology Reports*. – 2026. – Vol. 18. – Article e70280. DOI:10.1111/1758-2229.70280.
53. Alimi J.O., Bamishaye E.I., Alimi J.P. Yeasts as biological detoxifiers of mycotoxins in agricultural produce. A Review // *Food and Environment Safety Journal*. – 2025. – Vol. 24. – P. 21-32. DOI: 10.4316/fens.2025.003.
54. Papp L.A., Acs-Szabo L., Kovacs S., Adacsi C., Batta G., Pusztahelyi T., Pócsi I., Miklos I. Transcriptome changes of fission yeast cells exposed to fumonisin B1 or co-cultured with *Fusarium verticillioides* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2025. – Vol. 109. – Article 211. DOI: 10.1007/s00253-025-13601-3.
55. Xiao J., Tan J., Guo R., Dai J., Xiu Z., Sun Y., Liu H., Li Y., Tong Y., Quan C. Deoxynivalenol detoxification by a novel strain of *Pichia kudriavzevii* via enzymatic degradation and cell wall adsorption // *Appl. Biochem. Biotechnol.* – 2024. – Vol. 196. – P. 3102–3114. DOI: 10.1007/s12010-023-04712-6.
56. Acs-Szabo L., Pfliegler W.P., Kovacs S., Adacsi C., Racz H.V., Horvath E., Papp L.A., Murvai K.P., Kiraly S., Miklos I., Peter G., Pusztahelyi T., Pócsi I. Striking mycotoxin tolerance and zearalenone elimination capacity of the decaying wood associated yeast *Sugiyamaella novakii* (Trichomonascaceae) // *BMC Microbiology*. – 2025. – Vol. 25. – Article 422. DOI: 10.1186/s12866-025-04145-7.
57. Azizi T., Daneshyar M., Allymehr M., Tukmechi A., Behroozyar H.K., Jalali A.S. Effect of a probiotic (*Lactobacillus* sp.), yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) and mycotoxin detoxifier alone or in combination on performance, immune response and serum biochemical parameters in broilers fed deoxynivalenol-contaminated diets // *Animal Production Science*. – 2021. – Vol. 61. – P. 1553–1563. DOI: 10.1071/AN19728.
58. Fu Y., Yang Q., Solairaj D., Godana E.A., Routledge M.N., Zhang H. Biodegradation of mycotoxin patulin by the yeast *Meyerozyma guilliermondii* // *Biological Control*. – 2021. – Vol. 160. – Article 104692. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2021.104692.
59. Zhang M., Wen Y., Luo X., Wang X., Li J., Liu A., He L., Chen S., Ao X., Yang Y., Zou L., Liu S. Characterization, mechanism of cypermethrin biosorption by *Saccharomyces cerevisiae* strains YS81 and HP and removal of cypermethrin from apple and cucumber juices by inactive cells // *Journal of hazardous materials*. – 2021. – Vol. 407. – Article 124350. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124350.
60. Becerra K., Ghosh S., Godoy L. Pesticide and yeast interaction in alcoholic fermentation: A Mini-Review // *Fermentation*. – 2023. – Vol. 9. – Article 266. DOI: 10.3390/fermentation9030266.
61. Jacqui T., Deroite A., Raynal C., Julien-Ortiz A., Camarasa C. Detoxification capabilities of copper and pesticides by winemaking yeasts. // *OENO One*. – 2025. – Vol. 59. – Article 9438. DOI: 10.20870/oeno-one.2025.59.4.9438.
62. Stoyanova K., Gerginova M., Peneva N., Dincheva I., Alexieva Z. Biodegradation and utilization of the pesticides glyphosate and carbofuran by two yeast strains // *Processes*. – 2023. – Vol. 11. – Article 3343. DOI: 10.3390/pr11123343.
63. Danouche M., El Arroussi H., Bahafid W., El Ghachtouli N. An overview of the biosorption mechanism for the bioremediation of synthetic dyes using yeast cells // *Environmental Technology Reviews*. – 2021. – Vol. 10. – P. 58–76. DOI: 10.1080/21622515.2020.1869839.
64. Azeez R.A., Al-Zuhairi F.K.I. Biosorption of dye by immobilized yeast cells on the surface of magnetic nanoparticles // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 61. – P. 5213–5222. DOI: 10.1016/j.aej.2021.10.044.
65. Al-Tohamy R., Kenawy E.R., Sun J., Ali, S.S. Performance of a newly isolated salt-tolerant yeast strain *Sterigmatomyces halophilus* SSA-1575 for azo dye decolorization and detoxification. // *Frontiers in Microbiology*. – 2020. – Vol. 11. – Article 1163. DOI: 10.3389/fmicb.2020.01163.

66. *Ruscasso F., Bezus B., Garmendia G., Vero S., Curutchet G., Cavello I., Cavalitto S.* Debaryomyces hansenii F39A as biosorbent for textile dye removal // *Revista Argentina de Microbiología*. – 2021. – Vol. 53. – P. 257–265. DOI: 10.1016/j.ram.2020.10.004.
67. *Wang X., Wang Y., Ning S., Shi S., Tan L.* Improving azo dye decolorization performance and halotolerance of *Pichia occidentalis* A2 by static magnetic field and possible mechanisms through comparative transcriptome analysis // *Frontiers in microbiology*. – 2020. – Vol. 11. – Article 712. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00712.
68. *Kurade M.B., Waghmode T.R., Xiong J.Q., Govindwar S.P., Jeon B.H.* Decolorization of textile industry effluent using immobilized consortium cells in upflow fixed bed reactor. // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 213. – P. 884–891. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.218.
69. *Ali S.S., Al-Tohamy R., Koutra E., El-Naggar A.H., Kornaros M., Sun J.* Valorizing lignin-like dyes and textile dyeing wastewater by a newly constructed lipid-producing and lignin modifying oleaginous yeast consortium valued for biodiesel and bioremediation // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 403. – Article 123575. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123575.
70. *Al-Tohamy R., Ali S.S., Xie R., Schagerl M., Khalil M.A., Sun J.* Decolorization of reactive azo dye using novel halotolerant yeast consortium HYC and proposed degradation pathway // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2023. – Vol. 263. – Article 115258. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115258.
71. *Eltarhony M., El-Fakharany E., Abu-Serie M., ElKady M., Ibrahim A.* Statistical modeling of methylene blue degradation by yeast-bacteria consortium; optimization via agro-industrial waste, immobilization and application in real effluents // *Microbial Cell Factories*. – 2021. – Vol. 20. – Article 234. DOI: 10.1186/s12934-021-01730-z.
72. *Kovács R., Majoros L.* Fungal quorum-sensing molecules: A Review of their antifungal effect against *Candida* biofilms // *Journal of Fungi*. – 2020. – Vol. – 6. – Article 99. DOI: 10.3390/jof6030099.
73. *Kovács R., Jakab Á.* The effects of tyrosol on yeasts: an overview of current knowledge // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2025. – Vol. 109. – Article 201. DOI: 10.1007/s00253-025-13595-y.
74. *Huang X.F., Reardon K.F.* Quorum-sensing molecules increase ethanol yield from *Saccharomyces cerevisiae* // *FEMS Yeast Research*. – 2021. – Vol. 21. – Article foab056. DOI: 10.1093/femsyr/foab056.
75. *Zhang D., Wang F., Yu Y., Ding S., Chen T., Sun W., Liang C., Yu B., Ying H., Liu D., Chen Y.* Effect of quorum-sensing molecule 2-phenylethanol and ARO genes on *Saccharomyces cerevisiae* biofilm // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 105. – P. 3635–3648. DOI: 10.1007/s00253-021-11280-4.
76. *Li L., Pan Y., Zhang S., Yang T., Li Z., Wang B., Sun H., Zhang M., Li X.* Quorum sensing: cell-to-cell communication in *Saccharomyces cerevisiae* // *Frontiers in Microbiology*. – 2023. – Vol. 14. – Article 1250151. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1250151.
77. *Rodrigues C.F., Černáková L.* Farnesol and tyrosol: secondary metabolites with a crucial quorum-sensing role in *Candida* biofilm development // *Genes*. – 2020. – Vol. 11. – Article 444. DOI: 10.3390/genes11040444.
78. *Dižová S., Bujdáková H.* Properties and role of the quorum sensing molecule farnesol in relation to the yeast *Candida albicans* // *Pharmazie*. – 2017. – Vol. 72. – P.307-312. DOI: 10.1691/ph.2017.6174.
79. *Nath B.J., Das K.K., Talukdar R., Sarma H.K.* Tyrosols retrieved from traditionally brewed yeasts assist in tolerance against heavy metals and promote the growth of cells // *FEMS Microbiology Letters*. – 2021. – Vol. 368. – Article fnab152. DOI: 10.1093/femsle/fnab152.
80. *Zhang Q., Xiang J., Lv W., Liu Y., Sun J., Wan P., Jiang L.* Quorum sensing molecules in yeast wastewater treatment and their regulation of yeast cell morphology // *Journal of Water Process Engineering* – 2022. – Vol. 49. – Article 103191. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103191.
81. *Tang J., Liu Y., Lai F., Zhou Y., Zhang H., Ni B.J., Lv W.* Zinc ions suppress filamentation of *Candida tropicalis* and enhance stability of yeast-based oil-rich wastewater treatment // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2026. – Vol. 14. – Article 121504. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121504.

82. Sooklim C., Samakkarn W., Thongmee A., Duangphakdee O., Soontorngun N. Enhanced aroma and flavour profile of fermented *Tetragonula pagdeni* Schwarz honey by a novel yeast *T. delbrueckii* GT-ROSE1 with superior fermentability // *Food Bioscience*. – 2022. – Vol. 50. – Article 102001. DOI: /10.1016/j.fbio.2022.102001.
83. Nath B.J., Mishra A.K., Sarma H.K. Assessment of quorum sensing effects of tyrosol on fermentative performance by chief ethnic fermentative yeasts from northeast India // *Journal of Applied Microbiology*. – 2021. – Vol. 131. – P. 728–742. DOI: 10.1111/jam.14908.
84. Tian J., Lin Y., Su X., Tan H., Gan C., Ragauskas A.J. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* quorum sensing signal molecules on ethanol production in bioethanol fermentation process // *Microbiological Research*. – 2023. – Vol. 271. – Article 127367. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127367.
85. Huang X.F., Reardon K.F. Strategies to achieve high productivity, high conversion, and high yield in yeast fermentation of algal biomass hydrolysate // *Engineering in Life Sciences*. – 2022. – Vol. 22. – P.119–131. DOI: 10.1002/elsc.202100095.
86. Ma R., Huang Z., Jiang Y., Zhao A., Yu G., Lin C., Zhu L., Zhang X., Li X., Wang, C. Regulation of ethanol production from anaerobic fermentation of food waste using aromatic alcohol-based quorum-sensing molecules // *Journal of Environmental Management*. – 2025. – Vol. 376. – Article 124382. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124382.
87. Rosiana S., Zhang L., Kim G.H., Revtovich A.V., Uthayakumar D., Sukumaran A., Gedde-McAlister J., Kirienko N.V., Shapiro R.S. Comprehensive genetic analysis of adhesin proteins and their role in virulence of *Candida albicans* // *Genetics*. – 2021. – Vol. 217. – Article iyab003. DOI: 10.1093/genetics/iyab003.
88. Jung P., Mischo C.E., Gunaratnam G., Spengler C., Becker S.L., Hube B., Jacobs K., Bischoff M. *Candida albicans* adhesion to central venous catheters: Impact of blood plasma-driven germ tube formation and pathogen-derived adhesins. // *Virulence*. – 2020. – Vol. – 11. – P. 1453–1465. DOI: 10.1080/21505594.2020.1836902.
89. Gaálová-Radochová B., Kendra S., Jordao L., Kursawe L., Kikhney J., Moter A., Bujdáková H. Effect of quorum sensing molecule farnesol on mixed biofilms of *Candida albicans* and *Staphylococcus aureus*. // *Antibiotics*. – 2023. – Vol. 12. – Article 441. DOI: 10.3390/antibiotics12030441.
90. Efremenko E., Stepanov N., Senko O., Maslova O., Lyagin I., Domnin M., Aslanli A. “Stop, little pot” as the motto of suppressive management of various microbial consortia. // *Microorganisms*. – 2024. – Vol. 12. – Article 1650. DOI: 10.3390/microorganisms12081650.
91. del Rosario Agustín M., Tarifa M.C., Vela-Gurovic M.S., Brugnoli L.I. Application of natamycin and farnesol as bioprotection agents to inhibit biofilm formation of yeasts and foodborne bacterial pathogens in apple juice processing lines // *Food Microbiology*. – 2023. – Vol. 109. – Article 104123. DOI: 10.1016/j.fm.2022.104123.
92. Touil H.F.Z., Bouchéri, K., Bouchérit-Otmani Z., Kohder G., Madkour M., Soliman S.S.M. Optimum inhibition of amphotericin-B-resistant *Candida albicans* strain in single- and mixed-species biofilms by *Candida* and Non-*Candida* terpenoids // *Biomolecules*. – 2020. – Vol. 10. – Article 342. DOI: 10.3390/biom10020342.
93. Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Efremenko E. “Universal” antimicrobial combination of bacitracin and His6-OPH with lactonase activity, acting against various bacterial and yeast cells // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – Vol. 23. – Article 9400. DOI: 10.3390/ijms23169400.
94. Efremenko E., Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O. Enzymes with lactonase activity against fungal quorum molecules as effective antifungals. // *Biomolecules*. – 2024. – Vol. 14. – Article 383. DOI: 10.3390/biom14030383.
95. Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O., Efremenko E. Action enhancement of antimicrobial peptides by their combination with enzymes hydrolyzing fungal quorum molecules. // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – Vol. 280. – Article 136066. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.136066.
96. Efremenko E., Stepanov N., Senko O., Aslanli A., Maslova O., Lyagin I. Using fungi in artificial microbial consortia to solve bioremediation problems // *Microorganisms*. – 2024. – V. 12 – Article 470. DOI: 10.3390/microorganisms12030470.

97. Mittermeier F., Bäumler M., Arulrajah, P., García Lima J.J., Hauke S., Stock A., Weuster-Botz D. Artificial microbial consortia for bioproduction processes // *Engineering in Life Sciences*. – 2022. – Vol. 23. – Article e2100152. DOI: 10.1002/elsc.202100152.
98. Jiang Y., Wu R., Zhang W., Xin F., Jiang, M. Construction of stable microbial consortia for effective biochemical synthesis // *Trends in Biotechnology*. – 2023. – Vol. 41. – P.1430–1441. DOI: 10.1016/j.tibtech.2023.05.008.
99. Efremenko E., Stepanov N., Maslova O., Senko O., Aslanli A., Lyagin I. “Unity and struggle of opposites” as a basis for the functioning of synthetic bacterial immobilized consortium that continuously degrades organophosphorus pesticides. // *Microorganisms*. – 2022. – Vol. 10 – Article 1394. DOI: 10.3390/microorganisms10071394.
100. Darvishi F., Rafatiyan S., Abbaspour Motlagh Moghaddam M. H., Atkinson E., Ledesma-Amaro R. Applications of synthetic yeast consortia for the production of native and non-native chemicals // *Critical Reviews in Biotechnology*. – 2024. – Vol. 44. – P. 15–30. DOI: 10.1080/07388551.2022.2118569.
101. Stepanov N., Senko O., Aslanli A., Maslova O., Efremenko E. Enhanced biogas production from glucose and glycerol by artificial consortia of anaerobic sludge with immobilized yeast // *Fermentation*. – 2025. – Vol. 11. – Article 352. DOI: 10.3390/fermentation11060352.
102. Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Eseva E., Anisimov A., Efremenko E. Sulfur containing mixed wastes in anaerobic processing by new immobilized synthetic consortia // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 362. – Article 127794. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127794.
103. Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Polikarpova P., Lysenko S., Anisimov A., Efremenko E. Formation and use of anaerobic consortia for the biotransformation of sulfur-containing extracts from pre-oxidized crude oil and oil fractions // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 319. – Article 124248. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124248.
104. Elsamahy T., Sun J., Elsilik S.E., Ali S.S. Biodegradation of low-density polyethylene plastic waste by a constructed tri-culture yeast consortium from wood-feeding termite: Degradation mechanism and pathway // *Journal of Hazardous Materials*. – 2023. – Vol. 448. – Article 130944. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130944.
105. Kučić Grgić D., Miloloža M., Ocelić Bulatović V., Ukić Š., Slouf M., Gajdosova V. Screening the efficacy of a microbial consortium of bacteria and fungi isolated from different environmental samples for the degradation of LDPE/TPS films // *Separations*. – 2023. – Vol. 10. – Article 79. DOI: 10.3390/separations10020079.
106. Tunalı Boz D., Tansel Yalçın H., Çorbacı C.Ç., Bahriye Uçar, F. Screening and molecular characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons degrading yeasts // *Turkish Journal of Biochemistry*. – 2015. – Vol. 40. – P. 105–110. DOI: 10.5505/tjb.2015.16023.
107. Mandal S.K., Das N. Biodegradation of perylene and benzo[ghi]perylene (5-6 rings) using yeast consortium: Kinetic study, enzyme analysis and degradation pathway // *Journal of Environmental Biology*. – 2018. – Vol. 39. – P. 5–15. DOI: 10.22438/jeb/39/1/MRN-540.
108. Mandal S.K., Selvi A., Das N. A novel approach on degradation of benzo[a]pyrene by yeast consortium isolated from contaminated soil // *Pharma Letter*. – 2016. – Vol. 8. – P. 80–93.
109. Kamyabi A., Nouri H., Moghimi H. Characterization of pyrene degradation and metabolite identification by *Basidioascus persicus* and mineralization enhancement with bacterial-yeast co-culture // *Ecotoxicology and Environmental Safety* – 2018. – Vol. 163. – P. 471–477. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.07.098.
110. Hesham A.E.-L., Khan S., Tao Y., Li D., Zhang Y., Yang M. Biodegradation of high molecular weight PAHs using isolated yeast mixtures: Application of metagenomic methods for community structure analyses // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2012. – Vol. 19. – P. 3568–3578. DOI: 10.1007/s11356-012-0919-8.
111. Senko O., Maslova O., Stepanov N., Aslanli A., Lyagin I., Efremenko E. Role of humic substances in the (bio)degradation of synthetic polymers under environmental conditions // *Microorganisms* – 2024 – V. 12. – Article 2024. DOI: 10.3390/microorganisms12102024.

112. *Ефременко Е.Н., Лягин И.В., Маслова О.В., Сенько О.В., Степанов Н.А., Асланлы А.Г.* Каталитическое разложение микропластиков // *Успехи химии*. – 2023. – Т. 92. – № 2. – Стаття RCR5069. DOI: 10.57634/RCR5069.
113. *Chen H., Peng H., Ellis T., Ledesma-Amaro R.* Programmable cell–cell adhesion in synthetic yeast communities for improved bioproduction // *Nature Chemical Biology*. – 2026. – DOI: 10.1038/s41589-025-02081-1.
114. *Louhasakul Y., Cheirsilp B., Maneerat S., Prasertsan P.* Potential use of flocculating oleaginous yeasts for bioconversion of industrial wastes into biodiesel feedstocks // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 136. – P. 1311–1319. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.002.

Благодарности:

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121041500039-8 Молекулярный дизайн, структурно-функциональный анализ и регуляция ферментных систем, клеточных конструкций, бионаноматериалов: фундаментальные основы и приложения в технологии, медицине, охране окружающей среды).

Для цитирования:

Ефременко Е.Н., Степанов Н.А. Дрожжи в микробных консорциумах, осуществляющих биodeградацию органических эcopоллютантов // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2026. – № 3. – С. 72–92. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.5>

Сведения об авторах:

Ефременко Елена Николаевна, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией эcобиокатализа, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, («МГУ им. Ломоносова»), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 3; e-mail: elena_efremenko@list.ru, ORCID: 0000-0002-6992-854X

Степанов Николай Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории эcобиокатализа, «МГУ им. Ломоносова»; e-mail: na.stepano@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0821-8226

YEAST IN MICROBIAL CONSORTIA MEDIATING THE BIODEGRADATION OF ORGANIC ECOPOLLUTANTS

Efremenko E.N., Stepanov N.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Among microbial destructors of organic ecopollutants, yeast occupies a special place due to its ability to form consortia with various microorganisms. The study analyzes the most common partners of yeast cells in natural microbial consortia, and also identifies ecopollutants, whose degradation in contaminated environments under the influence of polymicrobial biosystems has been most thoroughly studied. Such ecopollutants include petroleum hydrocarbons, mycotoxins, fungicides, dyes, and synthetic polymers. A significant role of various yeast enzyme systems has been noted in their biodegradation. The natural chemical composition of yeast cell walls, as well as their ability to synthesize and intracellularly accumulate certain proteins and peptides, provide yeast cells with a powerful sorption potential in relation to various heavy metals that distinguish them from other microorganisms. The sorption characteristics of yeast are important not only for removing environmental pollutants from different media, but also for reducing their negative effects on other microorganisms in consortia with yeast. It is discussed that the maximum degree and rates of biodegradation of ecopollutants present in aquatic environments are achieved by consortia containing high concentrations of yeast cells. Special attention is paid to the formation of the quorum response in yeast and its

role in regulating the properties displayed by cells in consortia. It has been noted that the intensity of biofilm development as a manifestation of quorum in consortia can be regulated by controlling the concentration of specific quorum molecules. The possibilities and prospects of constructing artificial consortia involving yeast are discussed. The information presented provides an understanding of the role of yeast consortia in the biodegradation processes of organic ecopollutants which are highly in demand in the contemporary world.

Keywords: *quorum sensing, biocatalysts, artificial consortia, petroleum hydrocarbons, mycotoxins, fungicides, dyes, synthetic polymers*

Поступила в редакцию: 25.05.2026

Принята к публикации: 06.07.2026

АДГЕЗИЯ БАКТЕРИЙ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ ГИДРОФОБНОСТИ К ПОВЕРХНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Полудова Т.В., *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь*
Антипьева М.В., *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь*

Проведено исследование влияния гидрофобных характеристик бактерий и субстратов на интенсивность микробной колонизации синтетических полимеров. В качестве субстратов использовали полистирол, полипропилен и целлофан. В качестве тест-бактерий – *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis* и *Mycobacterium smegmatis*. Степень гидрофобности бактерий определяли в тесте с *n*-гексадеканом. Уровень гидрофобности полимеров оценивали путем измерения краевого угла смачивания. Интенсивность адгезии определяли с помощью светового микроскопа по количеству прикрепившихся клеток после инкубации бактерий на поверхности субстрата с последующим окрашиванием генцианвиолетом. Показано, что интенсивность адгезии зависит от гидрофобности как бактерий, так и субстратов. Так, для бактерий наблюдалась прямая зависимость между интенсивностью адгезии и степенью гидрофобности поверхности клеток. Однако наиболее подверженным бактериальной адгезии оказался амфифильный материал – полистирол. Следовательно, дополнительная гидрофобизация или гидрофилизация поверхности субстрата может препятствовать бактериальной адгезии. Кроме того, при тестировании адсорбционных свойств материалов целесообразно использовать несколько тест-бактерий с различными характеристиками клеточной поверхности.

Ключевые слова: адгезия, адсорбция, полистирол, полипропилен, целлофан, *Escherichia coli*, *Mycobacterium smegmatis*, *Staphylococcus epidermidis*

Введение

Адгезия микроорганизмов к поверхностям различных субстратов – первый и обязательный этап формирования биопленок [1, 2, 3]. Биопленки – структуры, формирующиеся на границе раздела фаз, являются основной формой существования бактерий в окружающей среде [4]. Именно в состоянии биопленок метаболическая активность прокариот проявляется наиболее интенсивно, что, в случае паразитарных форм, приводит к развитию патологических процессов [5, 6], а в случае сапрофитов обеспечивает оптимальное протекание процессов ассимиляции и биотрансформации органических субстратов [7]. Формированию биопленки предшествует этап первичной колонизации, который определяется взаимодействиями, возникающими между поверхностями субстрата и клеточной стенки бактерий. На первичном этапе действуют межмолекулярные силы различной природы, прежде всего гидрофобные, электростатические и Ван-дер-Ваальсовы. Начальные механизмы первичной колонизации не специфичны и зависят от физико-химических характеристик поверхностей пары субстрат-адгезив. Неспецифическая адгезия обратима, и ее интенсивность определяет развитие последующих специфических процессов адгезии, которые приводят к необратимому закреплению бактерий и создают основу для формирования биопленки [8].

Механизмы специфической адгезии патогенных бактерий к биотическим субстратам детально исследованы [5, 9]. В гораздо меньшей степени изучены механизмы взаимодействия прокариот с абиотическими поверхностями.

В настоящее время при изучении абиотических поверхностей наиболее широко используется разработанный в Японии стандарт для оценки антибактериальных свойств твёрдых непористых поверхностей, согласно которому в качестве тест бактерий рекомендуется использовать кишечную палочку и стафилококк [10]. Адгезионные и антиадгезионные свойства твёрдых поверхностей широко изучаются для конструкционных стоматологических материалов, как правило, в отношении кариесогенных микроорганизмов, таких как *Enterococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Candida* spp. и др. [11]. Свойства поверхностей широко изучаются и относительно материалов медицинского назначения, применяемых для изготовления имплантатов. Обычно для изучения адгезии бактерий к новым материалам принято использовать грамположительные бактерии рода *Staphylococcus* как наиболее частых колонизаторов имплантируемых устройств и возбудителей постимплантационных инфекций, а в качестве представителей грамотрицательных бактерий – *Escherichia coli* [12].

Изучение не специфических механизмов адгезии актуально не только со стороны медицинской и санитарной микробиологии, но и со стороны биотехнологии. Интерес к изучению взаимодействий бактерий и субстратов возрастает, в частности, в свете развития технологий конструирования материалов с заданными поверхностными характеристиками. Материалы, поверхности которых способствуют или препятствуют бактериальной адгезии, могут иметь широкую сферу применения и использоваться при создании биореакторов, биосенсоров, аэротенков, медицинского инструмента и оборудования, имплантатов, протезов, предметов общественного пользования, упаковки для продуктов питания и оборудования для пищевой промышленности.

При разработке новых материалов с противомикробными и антиадгезивными свойствами возникает проблема их воспроизводимой лабораторной верификации и валидации. Существующие стандартные микробиологические методы тестирования поверхностей подвергаются справедливой критике и требуют совершенствования [13]. Остаются открытыми вопросы: какие микроорганизмы использовать в качестве тест-объектов? Какое количество штаммов достаточно для надежного подтверждения исследуемого эффекта? Как воспроизвести условия конечного использования тестируемого материала? Перечисленные вопросы сохраняют свою актуальность, что свидетельствует, в частности, о недостаточном уровне исследования механизмов бактериальной адгезии на абиотических субстратах.

Изучение влияния гидрофобных характеристик различных твердых поверхностей и их шероховатости на адгезию бактерий неоднократно проводились, и эти характеристики продолжают исследоваться разными научными коллективами. Несмотря на большой объем данных, появление новых полимеров, наноматериалов и методов их обработки ставит перед наукой новые вызовы. Анализ большого количества экспериментальных данных и их сравнение открывают перспективы разработки универсальных методов и подходов для изучения этого важного биологического процесса.

Цель работы – изучение поверхностных характеристик субстратов и тест-бактерий с оценкой интенсивности их адгезии к промышленным синтетическим полимерам.

Материалы и методы

В работе исследованы полимерные поверхности из полипропилена (21020-02, сорт 1), полистирола (525М) и целлофана (ГОСТ 7730-89). Образцы полимеров размером 10×10 мм вырезали с помощью канцелярского ножа из полипропиленовых крышек-нахлбучек (РосПак, Россия), листового целлофана (ОАО «Химволокно», Россия) и полистироловых одноразовых чашек Петри (Медполимер, Россия).

Исследование морфологии поверхностей полимеров проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Dimension Icon («Veeco», США). Измерения выполняли на воздухе в полуконтактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов серии NSG01 («NT-MDT», Россия). Зонды имели следующие номинальные характеристики: радиус скругления острия – 10 нм, жесткость – 7Н/м, резонансная частота – 150 кГц.

Уровень гидрофобности полимерных поверхностей оценивали путем измерения краевого угла смачивания по модифицированному методу сидячей капли. Для этого на поверхности полимеров наносили несколько капель деионизированной воды («Milli-Q», Millipore) объемом 10 мкл, в течение 60 с после контакта с поверхностями фотографировали профиль капель. На фотографиях измеряли радиус (r) и высоту (h) капли. Контактные углы (θ) вычисляли по формуле $\theta = 2 \times \arctg(h/r)$.

В качестве тест-бактерий использовали грамотрицательные бактерии *E. coli* M-17, грамположительные кислотоустойчивые бактерии *Mycobacterium smegmatis* mc² 155 и *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228. Культивирование проводили при 37°C в течение 16-18 ч в жидкой питательной среде Luria Bertani, содержащей г/л дистиллированной воды: триптон – 10, дрожжевой экстракт – 5, KCl – 6,4.

Определение степени гидрофобности бактерий проводили с помощью МАТН-теста (Microbial Adhesion to Hydrocarbons) с *n*-гексадеканом в 0,2 М РUM-буфере (Phosphate-urea-magnesium), pH 7,1 [14]. Для этого суспензию бактерий в указанном буфере интенсивно встряхивали с *n*-гексадеканом (10:1) в течение 2 мин. Затем выдерживали в статических условиях до расслоения жидкостей и оценивали оптическую плотность бактериальной суспензии при 600 нм (спектрофотометр PD-303, «Arel», Япония), сравнивая полученное значение со значением оптической плотности до перемешивания с углеводородом.

Дзета-потенциал (Z-потенциал) бактерий определяли в воде («Milli-Q», Millipore) (pH 5,8) и РUM-буфере (pH 7,1) на лазерном анализаторе размера частиц и дзета-потенциала «Zetasizer Nano ZS» (Malvern, Великобритания).

Для изучения интенсивности адгезии бактерий готовили в 0,2 М РUM-буфере суспензию, содержащую 10⁷ колониеобразующих единиц в 1 мл (КОЕ/мл). По 3 мл суспензии бактерий наносили поверх фрагментов полимеров (10×10 мм), помещенных в чашку Петри диаметром 30 мм. Инкубацию проводили 15 мин при 37 °С. Затем жидкость удаляли, образцы полимеров трижды промывали в 5 мл стерильной воды и окрашивали 0,1% раствором генцианвиолета в течение 10 мин. Не связавшийся краситель трижды отмывали стерильной водой. Высушенные поверхности полимеров исследовали на микровизоре «Ломо» (Россия) с увеличением ×1000 раз. Интенсивность адгезии определяли прямым счетом количества связавшихся с поверхностью образца клеток бактерий, рассчитывая их среднее количество в поле зрения микровизора (не менее 10 полей зрения). Доверительные интервалы средних значений рассчитаны при $\alpha=0,05$ с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2016.

Результаты и обсуждения

Межмолекулярные силы, определяющие неспецифические взаимодействия пары бактерия-субстрат, выражены рядом поверхностных физико-химических характеристик, среди которых наибольшее значение имеют электростатические взаимодействия, рельеф поверхности субстрата и характер взаимодействия поверхностей с водой (гидрофобность/гидрофильность). Однако именно уровень гидрофобности бактериальной стенки считается основным фактором, определяющим степень и интенсивность неспецифической бактериальной адгезии [5, 7, 15]. В этой связи в качестве объекта исследования были выбраны представители бактерий, клетки которых резко отличаются друг от друга по уровню гидрофобности. Клеточная стенка *M. smegmatis* была наиболее гидрофобной: $84 \pm 6,34$ % клеток из смеси гексадекан/вода переходило в фазу гексадекана. Поверхность *S. epidermidis* демонстрировала амфифильные свойства – $49 \pm 4,52$ % клеток адсорбировалось гексадеканом. Клетки *E. coli* проявили выраженные гидрофильные свойства – показатель адсорбции гексадеканом для них составил 0%.

Как правило, поверхность полимерных материалов, таких как полистирол и полипропилен, обладает гидрофобными свойствами, а целлофан, напротив, хорошо смачивается водой. Оценка данного параметра исследуемых полимеров показала, что наибольшей гидрофобностью обладал полипропилен. Краевой угол смачивания для полипропилена составлял $74 \pm 4^\circ$. Значение краевого угла смачивания полистирола соответствовало $64 \pm 6^\circ$, что близко к пограничному значению (65°), при котором принято различать гидрофильные ($\theta < 65^\circ$) и гидрофобные материалы ($\theta > 65^\circ$). Таким образом, можно отметить, что поверхность исследуемого полистирола обладала амфифильными свойствами. На целлофане капля воды полностью растекалась ($\theta = 0^\circ$), характеризуя его как материал, поверхность которого проявляет ярко выраженные гидрофильные свойства [16].

Для определения электростатических сил, действующих в парах бактерия-субстрат, был изучен дзета-потенциал поверхности тестируемых бактерий. Наибольшим отрицательным значением дзета-потенциала обладали бактерии *M. smegmatis* mc^2 155, а наименьшим – *E. coli* M-17. Однако резкий сдвиг дзета-потенциала в сторону нейтральности наблюдался при увеличении ионной силы среды (в PUM-буфере). В данных условиях значение дзета-потенциала всех исследованных бактерий было практически одинаковым (Табл. 1).

Таблица 1

Дзета-потенциал поверхностей бактериальных клеток

Бактерии	Z-потенциал (вода), мВмВ	Z-потенциал (PUM-буфер), мВмВ
<i>E. coli</i> M-17	$-22,8 \pm 3,32$	$-8,7 \pm 1,84$
<i>M. smegmatis</i> mc^2 155	$-45,7 \pm 5,98$	$-10,5 \pm 2,54$
<i>S. epidermidis</i> ATCC 12228	$-30,9 \pm 4,62$	$-9,3 \pm 2,68$

Известно, что в солесодержащей среде происходит экранирование фактического поверхностного заряда катионами, которые сосредотачиваются вблизи отрицательных

зарядов на поверхности бактерий [17]. Поверхности твердых диэлектриков, как и бактерии, заряжены отрицательно. Поверхностные заряды синтетических полимеров, погруженных в водную среду, также уравниваются ионами двойного слоя. Такие поверхности считаются электронейтральными, но могут иметь значительную электрическую неоднородность [18]. Полученные данные позволяют считать влияние электростатических сил на адгезию бактерий к полимерам не существенным, поскольку в предложенных условиях значение дзета-потенциала для исследуемых бактерий достоверно не различалось.

В то же время, характер рельефа поверхности субстрата может способствовать бактериальной адгезии или, наоборот, препятствовать ей. Шероховатость и пористость поверхности увеличивает площадь соприкосновения бактерий, создавая, в сравнении с гладким рельефом, большую основу для прикрепления клеток к субстрату, а также обеспечивая дополнительную защиту от сил сдвига. В случае, если неровности поверхности меньше линейных размеров бактериальной клетки, может наблюдаться обратный эффект уменьшения интенсивности бактериальной адгезии [19].

АСМ-сканирование поверхностей исследуемых полимеров показало, что полипропилен и полистирол обладают схожей гладкой текстурой с незначительным бороздчатым рельефом, что позволяет пренебречь влиянием характера рельефа поверхностей этих полимеров на бактериальную адгезию. Однако наблюдаемая текстура целлофана с бугристостью и впадинами может оказывать определенное влияние на интенсивность закрепления клеток (Рис. 1).



Рис. 1. АСМ-изображения поверхностей полимеров:
1 – полипропилен, 2 – полистирол, 3 – целлофан

Сродство бактерий к полимерным поверхностям было неодинаковым, как между бактериями, так и в зависимости от типа поверхности. Наибольшим сродством к полипропилену и полистиролу обладали бактерии *M. smegmatis* mc² 155. На гидрофильной поверхности целлофана бактерии *M. smegmatis*, обладающие высокой гидрофобностью, были выявлены в наименьшем количестве. Интенсивность адгезии *E. coli* M-17 и *S. epidermidis* ATCC12228 к разным материалам возрастала по мере снижения гидрофобности полимеров. При этом на поверхности целлофана фиксировалось наибольшее количество бактерий кишечной палочки и стафилококка (Рис. 2).

Полученные данные хорошо согласуются с общепринятым в литературе представлением о том, что для бактерий отмечается четкая прямая корреляция гидрофобных и адгезивных свойств [5, 7, 15].

В группе полимеров амфифильный полистирол оказался наиболее подвержен адгезии грамположительных бактерий, причем гидрофобные бактерии *M. smegmatis* проявили наибольшее сродство именно к этому материалу. Из-за выраженной

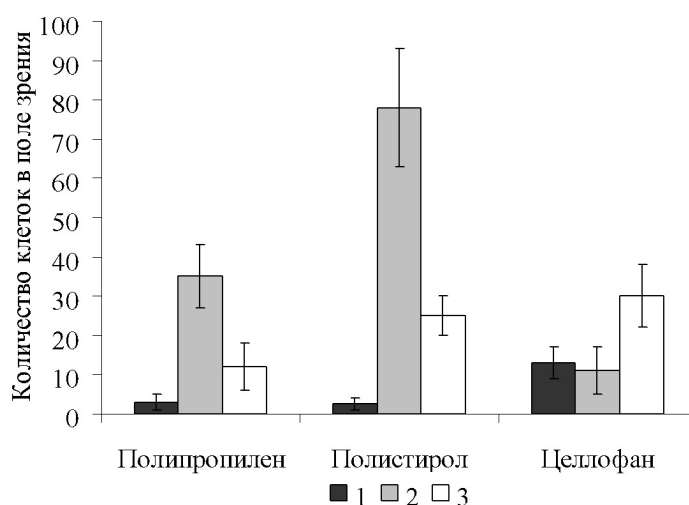


Рис. 2. Адгезия бактерий на поверхности полимерных материалов
1 – *E. coli*, 2 – *M. smegmatis*, 3 – *S. epidermidis*

гидрофобности микобактерии легко прикрепляются к неполярным или амфифильным поверхностям. Однако при формировании биопленки на границе твердая поверхность/жидкость ключевую роль играют экзополисахариды и амфифильные гликопептидолипиды. Их количество в клеточных стенках микобактерий относительно не велико, но именно эти структуры могут играть ключевую роль в усилении неспецифической адгезии на амфифильных поверхностях [20].

Отдельно следует отметить, что гидрофильный целлофан сорбировал амфифильные клетки *S. epidermidis* аналогично с полистиролом (Рис. 2). Это может быть связано с амфифильностью стафилококков и наличием у них специфических факторов адгезии [21]. Адгезивные свойства гидрофильных бактерий *E. coli* наиболее интенсивно проявлялись в отношении гидрофильного целлофана, который сорбировал максимальное количество бактерий *E. coli* по сравнению с другими полимерами. Данное поведение бактерий кишечной палочки и стафилококка могло быть также обусловлено особенностями микрорельефа поверхности целлофана, обладающего большей шероховатостью, чем полистирол и полипропилен.

Заключение

Проведенные исследования показали, что синтетические полимеры с амфифильными поверхностями могут быть более подвержены адгезии бактерий, обладающих определенной степенью гидрофобности, чем гидрофобные или гидрофильные материалы. При конструировании поверхностей, препятствующих бактериальной адгезии, следует учитывать, что гидрофобизация или гидрофилизация субстрата может способствовать проявлению антиадгезионных характеристик. В то же время гидрофильные материалы обладают высоким сродством с бактериями, обладающими оводнённой клеточной поверхностью, что характерно для большинства представителей грамотрицательных бактерий. Результаты проведенных исследований указывают, что в случае изучения неспецифических механизмов бактериальной адгезии на абиотических субстратах не следует ограничиваться одним видом микроорганизма или одним типом субстрата, большую ценность имеют исследования

целого ряда пар бактерия-субстрат, в котором спектр физико-химических поверхностных характеристик должен быть представлен как можно шире. Тестирование адгезивных свойств различных материалов необходимо проводить с использованием бактерий с гидрофобными, амфифильными и гидрофильными поверхностями клеток, а не ограничиваться узким рядом микроорганизмов, характерных для узкоспециализированных экологических ниш. Антиадгезивные свойства материала в отношении одной группы микробов не могут гарантировать отсутствие сродства бактерий других групп к исследуемому субстрату.

Библиографический список

1. Nikolaev Yu.A., Plakunov V.K. Biofilm – «city of microbes» or an analogue of multicellular organisms? // Microbiology. – 2007. – Vol. 76. – No. 2. – P. 125-138. – DOI10.1134/S0026261707020014.
2. Nozhevnikova A.N., Bochkova E.A., Plakunov V.K. Multi-species biofilms in ecology, medicine, and biotechnology // Microbiology. – 2015. – Vol. 84. No. 6. – P. 731-750. – DOI: 10.1134/S0026261715060107.
3. Максимова Ю.Г., Максимов А.Ю., Демаков В.А. Адгезия бактериальных клеток на углеродных носителях: характеристики процесса и применение в биотехнологии // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2019. – № 3. – С. 86-93. – DOI: 10.7242/2658-705X/2019.3.9.
4. Costerton J.W., Geesey G.G., Cheng K-J. How Bacteria Stick // Scientific American. – 1978. – Vol. 238. – P. 86-95.
5. Серегина Н.В., Честнова Т.В., Жеребцова В.А., Хромушина В.А. Обзор биофизических особенностей микробной адгезии // Вестник новых медицинских технологий. – 2008. – Т. 15. – № 4. – С. 175-177.
6. Hartmann M., Lindhorst T. Understanding Bacterial Adhesion // G.I.T. Laboratory Journa. – 2010. – Vol. 5. – P. 32-34.
7. Dunne W.M. Bacterial Adhesion: Seen Any Good Biofilms Lately? // Clinical Microbiology Reviews. – 2002. – Vol. 15. – P. 155–166.
8. Plakunov V.K., Zhurina M.V., Mart'yanov S.V., Gannesen A.V. Biofilms as a Probable Basic Form of Microbial Existence: Present-Day Notions // Microbiology. – 2025. – Vol. 94. – No. 4. – P. 461-483. – DOI10.1134/S0026261725601083.
9. Зубарева И.В., Береништейн Т.Ф., Федянин С.Д. Об адгезии грамположительных кокков // Вестник Витебского государственного медицинского университета. – 2010. – Т. 9. – № 1. – С. 6-15.
10. JISZ2801:2010 / AMENDMENT 1: 2012 Japanese Industrial Standard 2012. Antimicrobial products. Test for antimicrobial activity and efficacy (Amendment 1). – URL: <https://webstore.ansi.org/standards/jis/jis28012010/> (дата обращения: 14.04.2026).
11. Царёв В.Н., Степанов А.Г., Ипполитов Е.В., Подпорин М.С., Царёва Т.В. Контроль первичной адгезии микроорганизмов и формирования биоплёнок на стоматологических материалах, используемых для трансдентальной имплантации при зубосохраняющих операциях // Клиническая лабораторная диагностика. – 2018. – Т. 63. – № 9. – С. 568-573. – DOI10.18821/0869-2084-2018-63-9-568-573.
12. Matinha-Cardoso J., Mota R., Gomes L.C., Gomes M., Mergulhao F.J., et al. Surface activation of medical grade polyurethane for the covalent immobilization of an anti-adhesive biopolymeric coating // J. Materials Chemistry. – 2021. – Vol. 9. – No. 17. – P. 3705-3715. DOI: 10.1039/d1tb00278c.
13. Cunliffe A.J., Askew P.D., Stephan I., Iredale G., Cosmans P., et al. How Do We Determine the Efficacy of an Antibacterial Surface? A Review of Standardised Antibacterial Material Testing Methods // Antibiotics (Basel). – 2021. – Vol. 10. – No. 9. – P. 1069. DOI:10.3390/antibiotics10091069.
14. Rosenberg M., Gutnick D., Rosenberg E. Adherence of bacteria to hydrocarbons: A simple method for measuring cell-surface hydrophobicity // FEMS Microbiology Letters. – 1980. – Vol. 9. – No. 1. – P. 29-33.

15. *Дмитриева Н.Ф., Брико Н.И., Вылегжанина Е.С.* Гидрофобность *Streptococcus pyogenes* как возможный маркер его вирулентности // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 1996. – Т. 2. – С. 21-24.
16. *Jothi Prakash C.G., Prasanth R.* Approaches to design a surface with tunable wettability: a review on surface properties // Journal of Materials Science. – 2021. – Vol. 56. – P. 108-135. DOI: 10.1007/s10853-020-05116-1.
17. *Brown D.G., Zhu H., Albert L.S., Fox J.T.* Rapid Characterization and Modeling of Natural and Undefined Charge-Regulated Surfaces in Aqueous Systems // Langmuir. – 2019. – Vol. 35. No. 43. – P. 14083-14091. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02265.
18. *De Lima Burgo T.A., Rezende C.A., Bertazzo S., Galembeck A., Galembeck F.* Electric potential decay on polyethylene: Role of atmospheric water on electric charge build-up and dissipation // Journal of Electrostatics. – 2011. – Vol. 69. – No. 4. – P. 401-409. DOI: 10.1016/j.elstat.2011.05.005.
19. *Morozov I.A., Kamenetskikh A.S., Scherban M.G.* The challenges of creating deformable plasmacoatings on the surface of elastic polymers // Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2019): Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. – Екатеринбург. – 2019. – Vol. 2176. – P.040009. DOI: 10.1063/1.5135158.
20. *Viljoen A., Dufrene Y.F., Nigou J.* Mycobacterial Adhesion: From Hydrophobic to Receptor-Ligand Interactions // Microorganisms. – 2022. – Vol. 10. – №2. – P.454. DOI: 10.3390/microorganisms10020454.
21. *Ерошенко Д.В., Коробов В.П.* Адгезия стафилококков: первый шаг к образованию биопленок // Успехи современной биологии. – 2017. – Т. 137. – №1. – С. 100–112.

Благодарности:

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания №124020500028-4 «Биоразнообразие микроорганизмов антропогенно загрязненных экосистем и функционально-генетические механизмы их адаптации к стрессовым условиям окружающей среды».

Для цитирования:

Полюдова Т.В., Антипова М.В. Адгезия бактерий с разным уровнем гидрофобности к поверхности синтетических полимеров // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 93–101. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.6>

Сведения об авторах:

Полюдова Татьяна Вячеславовна, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биохимии развития микроорганизмов, 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: polyudova@iegm.ru, ORCID: 0000-0002-9536-694X

Антипова Марина Владимировна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: girmar@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2955-2258

ADHESION OF BACTERIA WITH DIFFERENT LEVELS OF HYDROPHOBICITY TO THE SURFACE OF SYNTHETIC POLYMERS

Polyudova T.V., Antipova M.V.

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS, Perm

The role of the hydrophobic characteristics of bacteria and substrate on the intensity of microbial colonization of synthetic polymers was studied. Polystyrene, polypropylene, and cellophane were used as substrates. *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*,

and *Mycobacterium smegmatis* served as test bacteria. The degree of hydrophobicity of the bacterial surface was determined via an n-hexadecane test. The hydrophobicity of the polymers was assessed by measuring the contact angle. The intensity of adhesion was determined using a light microscope by the number of attached cells after incubation of bacteria on the substrate surface, followed by staining with gentian violet. It has been shown that the intensity of adhesion depends both on the hydrophobicity of the bacteria and on the substrates. Thus, for bacteria, a direct relationship was observed between the intensity of adhesion and the degree of cell surface hydrophobicity. However, the amphiphilic material that proved to be most susceptible to bacterial adhesion was polystyrene. Therefore, additional hydrophobization or hydrophilization of the substrate surface can hinder bacterial adhesion. Furthermore, when testing the adsorption properties of materials, it is advisable to use several test bacteria with different cell surface characteristics.

Keywords: *adhesion, adsorption, polystyrene, polypropylene, cellophane, Escherichia coli, Mycobacterium smegmatis, Staphylococcus epidermidis*

Поступила в редакцию: 07.05.2026

Принята к публикации: 26.06.2026

БИОЦИДНЫЕ ГУАНИДИНИЕВЫЕ И ФОСФОНИЕВЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Горбунова М.Н., *Институт технической химии УрО РАН, Пермь*

В обзоре приведены представители фосфониевых и гуанидинсодержащих полимеров, ранее полученные в России и за рубежом. Известно, что введение в полимеры гуанидиниевой и фосфониевой групп придает материалам на их основе высокую антимикробную активность. Перспективными химическими структурами для получения новых биоцидных полимеров являются впервые синтезированные в «ИТХ УрО РАН» уникальные мономеры – 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиний и трис(диэтиламино) диаллиламинофосфоний хлориды. На их основе получены новые биоцидные сополимеры, исследованы количественные физико-химические закономерности процессов образования полимеров, определена возможность для регулирования строения, структуры, молекулярных масс и биоцидных свойств. В обзоре представлены полученные полимерные материалы и показан большой потенциал полимерных солей в качестве бактерицидов и антисептиков. Синтезированные сополимеры на основе гуанидиниевой и фосфониевой солей были рассмотрены также в качестве наностабилизирующих матриц для частиц серебра, благодаря присутствию функциональных групп в сополимерах, способствующих эффективной стабилизации наночастиц металлов. Полученные полимерные материалы за счет синергетического усиления биоцидных свойств обладают высокой бактерицидной активностью и имеют большие перспективы при разработке агентов для борьбы с бактериальными биопленками.

Ключевые слова: гуанидиниевая соль, фосфониевые соли, сополимеры, нанокмпозиты, бактерициды

В настоящее время разработка новых антибактериальных средств крайне необходима для борьбы с бактериальными инфекциями – основной глобальной проблемой, угрожающей здоровью человека. Среди них полимерные гуанидиниевые и фосфониевые соли заслуживают особого внимания благодаря своему сильному антибактериальному действию и другим преимуществам, включая низкую устойчивость бактерий к лекарственным препаратам.

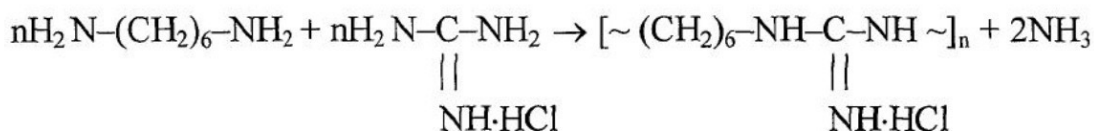
Гуанидинсодержащие полимеры

Гуанидиновые соединения представляют важный класс азотистых оснований, которые широко встречаются в природе и обладают разнообразной биологической активностью. Известно, что гуанидиновая группировка в элементарном звене полимеров является ключевым фармакофором, который обеспечивает выраженные антимикробные, антибактериальные и противогрибковые свойства [1], что позволяет широко использовать такие полимеры и материалы на их основе в качестве биоцидных препаратов [2-31].

Соединения, содержащие гуанидиновую группу, были впервые синтезированы в начале 20-го века [2], а с конца 40-х годов к ним уже наблюдался повышенный интерес.

К тому времени были выявлены высокие антибактериальные свойства соединений, содержащих гуанидиновую группу, что привело к использованию их в качестве основы для создания целого спектра медицинских препаратов и дезинфицирующих средств.

Так, в России был разработан и масштабирован метод получения на основе гексаметилендиамина и гидрохлорида гуанидина мощного полимерного гуанидинового антисептика пролонгированного действия – полигексаметиленгуанидин гидрохлорида [5, 6]:



Авторами [7] представлен синтез гуанидиновых полимеров (полигексаметиленгуанидин гидрохлорида и полигексаметиленбигуанидин гидрохлорида) и выявлена их высокая активность в отношении широкого ряда бактерий и грибов. Взаимодействие некоторых полигексаметиленбигуанидов с клеточной мембраной было исследовано Broxton et al. [8-10]. Были использованы димер с аминными концевыми группами, полидисперсная смесь и высокомолекулярная фракция полигексаметиленбигуанидин гидрохлорида. Анализ антимикробной активности полигексаметиленбигуанидин гидрохлорида показал ее резкое увеличение с ростом длины полимерной цепи.

Японские ученые в работах [11-13] описали синтез полимеров четвертичных аммониевых соединений и бигуанидов и исследовали влияние молекулярной массы полимеров на антимикробную активность. Показано значительно более высокое бактерицидное действие в отношении золотистого стафилококка полимерных бигуанидов по сравнению с мономером и полимерами на основе четвертичных аммониевых соединений.

Были получены гидрохлорид полигексаметиленгуанидина и три его новых аналога, включая гидрохлорид полибутаметиленгуанидина, гидрохлорид полиоктаметиленгуанидина и гидрохлорид поли(м-ксилиленгуанидина), и оценен их потенциал в разработке стерильных поверхностных материалов для контроля внутрибольничных инфекций [14]. Оценена их активность против 370 клинических штаммов. Полиоктаметиленгуанидин гидрохлорид и полигексаметиленгуанидин гидрохлорид продемонстрировали превосходную антимикробную активность против антибиотикорезистентных бактерий, часто вызывающих внутрибольничные инфекции. Полиоктаметиленгуанидин гидрохлорид имел более низкие значения минимальной ингибирующей концентрации (0.5–16 мг/л) против чувствительных и резистентных к антибиотикам клинических штаммов по сравнению с полигексаметиленгуанидин гидрохлоридом (1–64 мг/л) и диглюконатом хлоргексидина (2–64 мг/л).

В работе [15] изложено, как полигексаметиленгуанидин гидрохлорид был протестирован на эффективность против контрольных штаммов *S. aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella choleraesuis*, метициллин-резистентного *S. aureus* и *E. coli*. Было установлено, что полигексаметиленгуанидин гидрохлорид уничтожает метициллин-резистентные *S. aureus* и *E. coli* при концентрациях всего 0.04 и 0.005 масс.%, соответственно, в течение 1.5 мин. Механизм действия полигексаметиленгуанидин гидрохлорида был установлен с помощью

трансмиссионной электронной микроскопии. Основной мишенью полигексаметиленгуанидин гидрохлорида является, по-видимому, клеточная оболочка. Полигексаметиленгуанидин гидрохлорид проникает в клеточную оболочку, одновременно атакуя клеточную стенку и мембрану. Это приводит к разрыву клеточной оболочки и утечке содержимого цитоплазмы. Согласно работе [16], производные гуанидина быстро притягиваются к отрицательно заряженной поверхности бактериальной клетки, вызывая сильную и специфическую адсорбцию на фосфатсодержащих соединениях. Целостность внешней мембраны нарушается, и полимеры притягиваются к внутренней мембране. Происходит связывание производных гуанидина с фосфолипидами, вызывая полную потерю функции мембраны. Кроме того, наблюдается прямое взаимодействие между полигексаметиленгуанидин гидрохлоридом и компонентами цитоплазмы. Проникновение полигексаметиленгуанидин гидрохлорида внутрь цитоплазмы вызывает также осаждение белков и нуклеиновых кислот, провоцируя коагуляцию цитозоля [16]. Полигексаметиленгуанидин гидрохлорид может использоваться в качестве дезинфицирующего средства без запаха, цвета, не вызывающего коррозии и безвредного для больничных и бытовых помещений.

Получены модифицированные гуанидиновые полимеры на основе гексаметилендиамина и гуанидингидрохлорида, сшитые эпихлоргидрином. Было установлено, что полученный модифицированный гуанидиновый полимер является эффективным антимикробным агентом с минимальной ингибирующей концентрацией всего 8 ppm [17]. Утечка внутриклеточных компонентов достигает максимума при различном времени контакта для различных концентраций модифицированного гуанидинового полимера, а при определенной концентрации гибель бактерий растет с увеличением времени контакта. Методом атомно-силовой микроскопии подтвержден механизм антимикробного действия полимеров, основанный на деструкции клеточной мембраны бактерии. Бактериальные клетки сохраняют целостную форму после контакта с модифицированным гуанидиновым полимером в течение до 30 минут при низкой концентрации (5 ppm), а при воздействии более высокой концентрации полимера (50 ppm) уже через 1 минуту наблюдается полное разрушение клеточной мембраны.

Разработан метод синтеза значительного ряда солей (фосфат, глюконат, сорбат, фторид, сульфат, нитрат, силикат, ацетат, стеарат, олеат, фумарат, сукцинат, адипинат, себацинат) на основе полимерного гуанидинового антисептика – полигексаметиленгуанидин гидрохлорида [18]. Полигексаметиленгуанидин стеарат и полигексаметиленбигуанидин стеарат обладают хорошей антимикробной активностью в отношении бактерий и грибов (МИК полимеров не превышает 200 мкг мл⁻¹) [7].

В исследовании [19] предложены разработки новых алкилен- и оксиалкиленгуанидиновых антисептиков. Гидрофобные полиэтиленовые звенья, соединяющие гуанидиновые группировки, способствуют абсорбции полигуанидинов на фосфолипидных мембранах клеток, ингибированию ферментов и угнетению дыхательной системы клетки, что приводит к ее гибели. Важно, что при этом синтезированные полимеры остаются нетоксичными для человека.

Гуанидиновая группировка является определяющим структурным элементом многих известных медицинских препаратов и антибактериальных средств. Так, она является активным центром известных лекарственных препаратов, таких как фарингосепт и стрептомицин. Водные и спиртовые растворы производных гуанидина также обладают бактерицидной и фунгицидной активностью [19]. Включение

производных гуанидина в состав полимеров и полимерных композиций позволяет сохранить их уникальные антимикробные свойства. Благодаря своей катионной природе и способности к делокализации положительного заряда, гуанидиновый фрагмент легко связывается с отрицательно заряженными клеточными мембранами, нарушая их проницаемость и вызывая гибель бактерий [20, 21].

Хлоргексидин, полигексаметиленбигуанидин и полигексаметиленгуанидин являются наиболее известными гуанидинсодержащими биоцидными препаратами. Все эти соединения имеют катионную природу, в их составе имеется гуанидиновая или бигуанидиновая группировка, которая обеспечивает выраженный антимикробный эффект за счет разрушения клеточных мембран микроорганизмов. Около четверти от общего объема дезинфицирующих средств, которые применяются для бактерицидной обработки поверхностей в России, производятся на основе производных гуанидина. Это обусловлено пролонгированным антимикробным действием и низкой токсичностью материала.

Georgopoulos et al. получили полимерный гуанидин AKACID Plus, смесь поли(гексаметиленгуанидиний хлорида) и поли[2-(2-этокс)этоксиэтил гуанидиний хлорида] в соотношении 3:1 [22]. Он является новым представителем полимерных антимикробных препаратов катионного типа. AKACID Plus показывает высокую растворимость в воде и сочетает низкую острую токсичность и антипролиферативное действие с широким антимикробным спектром против бактерий, дрожжей и нитевидных грибов. Была проведена оценка активности *in vivo* различных концентраций кремовой формы AKACID Plus на модели экспериментальной кожной инфекции, вызванной метициллин-резистентным *S. aureus*, у морских свинок. Результаты доклинических исследований на морских свинках показали, что крем AKACID Plus 0.5% является эффективным средством для местного лечения кожных инфекций, вызванных метициллин-резистентным золотистым стафилококком.

Новые реакционноспособные гуанидинсодержащие мономеры (акрилат гуанидина и аминогуанидина, метакрилат гуанидина и аминогуанидина, N,N-диаллилгуанидинацетат, N,N-диаллилгуанидинтрифторацетат) и водорастворимые полимерные продукты на их основе, обладающие высокой биоцидной активностью, синтезированы Хашировой С.Ю. с соавторами [23]. Биоцидные гуанидинсодержащие производные на основе полиметакрилатов и поликапролактона также представлены в работах [24-27].

Введение гуанидиновых групп в макромолекулы биополимеров – один из методов синтеза высокоэффективных и безопасных антимикробных полимеров [28, 29]. Уникальная структура гуанидина и наличие высокореакционноспособных аминогрупп способствуют широкой модификации материалов, что приводит к получению различных биоцидных полимеров катионной природы. Путем реакции гидрохлорида полигексаметиленгуанидина с крахмалом синтезирован полимерный гуанидин, потенциал которого показан в качестве потенциальной антимикробной добавки при производстве бумаги [30]. В статье [31] описано, как гуанидиновый полимер был синтезирован посредством двухстадийной поликонденсации с последующим образованием комплексов с хитозаном, в которых хитозан выступал в качестве носителя для антимикробных полимеров и промоутера для образования волоконно-полимерных сетей.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что исходя из своей природы сополимеры на основе впервые синтезированного в «ИТХ УрО РАН» мономера – хлорида 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиния (АГХ) – могут выступать в качестве перспективной основы для синтеза новых биоцидных материалов.

Сополимеры АГХ с винилацетатом (ВА), винилпирролидоном (ВП), N-(n-ацетилфенил)малеимидом (АФМИ), N-(n-карбоксифенил)малеимидом (КФМИ), N-аллилмалеимидом (АМИ) и малеиновой кислотой (МК) были получены методом радикальной сополимеризации в присутствии инициатора динитрила азобисизомасляной кислоты [32-36].

Результаты исследований противомикробной активности сополимеров гуанидиниевой соли представлены в таблице 1.

Таблица 1

Антимикробное действие сополимеров 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиний хлорида [32-36]

Минимальная ингибирующая концентрация (МИК), мкг/мл	Наименование вида (штамма) микроорганизма			
	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	<i>Staphylococcus epidermidis</i> 33	<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 6633	<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922
АГХ- SO ₂	7.8	15.6	31.2	500
АГХ- ВА	62.5	31.2	62.5	250
АГХ- ВП	250	250	125	500
АГХ- АФМИ	15.6	31.2	62.5	62.5
АГХ- КФМИ	125	125	125	125
АГХ-АМИ	125	62.5	125	62.5
АГХ- МК	31.2	31.2	62.5	125

Можно заметить антибактериальную активность всех сополимеров в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных микроорганизмов. Тем не менее, при обработке грамположительных и грамотрицательных бактерий наблюдаются заметные различия. Видно, что грамотрицательные бактерии более устойчивы к действию наших антимикробных веществ по сравнению с грамположительными бактериями. Грамотрицательные бактерии характеризуются наличием внешней мембраны, обеспечивающей защиту от воздействий, которые обычно могут повредить пептидогликановый слой или внутреннюю мембрану [37, 38].

Фосфониевые полимеры

Наличие в полимерах фосфониевой группы также придает им антимикробную активность. Полиглицидилметакрилат, модифицированный соединениями фосфора (трифенилфосфином и трибутилфосфином), обладающий выраженной антимикробной активностью в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий и грибов, был получен Kenawy E.R. et al. [39].

Синтезу полимерных фосфониевых солей посвящен ряд работ Ikeda T. et al. [40-43]. Показано, что функционализация четвертичной фосфониевой солью широкого ряда синтетических полимеров приводит к высокой биоцидной активности последних [44]. Способ получения ионных полимеров, содержащих четвертичную фосфониевую группу, для антибактериального применения представлен в патентах [45, 46].

Синтезирован водорастворимый поли[3-(4-триметилфосфинобутил)тиофенбромид], имеющий фосфониевую группу на конце боковой цепи и избирательно распознающий и разделяющий грамположительные бактерии [47, 48]. Модификация его концевой группы значительно изменяет реакцию бактерий, в частности, вызвав аномальный фиброз у грамотрицательных *E. coli*. Результаты подчеркивают критическую роль молекулярной массы полимера, что позволяет выбрать полимер с короткой полимерной цепью в качестве перспективного кандидата для селективного контроля и разделения бактерий.

В работе [49] представлено, как синтезирован натуральный водорастворимый полисахарид – пуллулан, модифицированный четвертичной фосфониевой солью. Данный природный полимер, содержащий фосфониевую группу, проявил *in vitro* антибактериальную активность против *S. aureus* и *E. coli*, которая обусловлена повреждением клеточных стенок/мембран бактерий за счет электростатических и гидрофобных взаимодействий. Пуллулан, содержащий фосфониевую группу, согласно данной работе, перспективен в качестве нового антибактериального средства для лечения раневых инфекций.

В «ИТХ УрО РАН» методом радикальной сополимеризации в присутствии инициатора динитрила азобисизомасляной кислоты впервые синтезирован фосфониевый мономер, диаллиламинотрис(диэтиламино) фосфоний хлорид (ДААФ-Cl) [50], имеющий большой потенциал для разработки новых антимикробных агентов.

Результаты исследований противомикробной активности показали, что сополимер ДААФ-Cl с диоксидом подавляет рост стафилококка и микрококка в интервале концентраций 7.8-15.6 мкг/мл. Гибель *Bacillus subtilis* отмечена при воздействии концентрации 7.8 мкг/мл, а *Escherichia coli* – 62.5 мкг/мл. Как и в случае гуанидиниевых сополимеров, грамотрицательные бактерии более устойчивы к действию фосфониевого полимера по сравнению с грамположительными бактериями.

Наностабилизирующие матрицы для частиц серебра

Нанотехнология представляет собой хорошую платформу для создания новых антибактериальных средств. С давних пор известно об антимикробной активности серебра и его соединений. Заметные бактерицидные свойства металлического серебра обусловлены его медленным окислением и высвобождением ионов серебра в окружающую среду [51]. Наночастицы серебра, благодаря нанометровому размеру, обладают уникальными свойствами и являются высокоэффективными антимикробными агентами в отношении бактерий, спор и грибов. В связи с этим представляется перспективным использование нанокompозитов серебра в качестве скаффолдов для разработки новых биоцидных агентов.

На антимикробные свойства наночастиц серебра, как выяснилось, заметное влияние оказывает морфология частиц [52]. Так, в случае нанотреугольников полное ингибирование биопленок наблюдается уже при концентрации 1 мкг, в случае

сферических частиц полная остановка роста пленок наблюдается лишь при концентрации 100 мкг, а в случае наностержней даже при концентрации серебра 100 мкг наблюдается рост отдельных колоний.

Исследованию биоцидных полимерных нанокомпозитов серебра в последние годы уделяется большое внимание. В качестве наностабилизирующих полимерных матриц для частиц серебра используются как природные полимеры и их производные (желатин, крахмал, хитозан, целлюлоза, альгинат натрия), так и синтетические полимеры (поливиниловый спирт, поливинилпирролидон) [53-59].

Среди доступных синтетических полимеров широкое применение в биомедицине находят полиуретаны [60]. В работе [61] изложено, как был синтезирован серебряный нанокомпозит на основе функционализованного материала полиэтиленгликоль-полиуретан- TiO_2 и отмечена его высокая антимикробная активность в отношении *B. subtilis* and *E. coli*. Интересным аспектом проделанного исследования является вызванное наличием TiO_2 фотовосстановление нитрата серебра в наночастицы серебра в полимерной матрице.

Для стабилизации частиц серебра используют и другие синтетические полимеры, такие как поли(метилметакрилат) и термопластичные алифатические полиуретаны [62]. Полученные композиционные материалы обладают превосходной противомикробной активностью в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий и грибов (*C. albicans*, *Aspergillus niger*, и *Saccharomyces cerevisiae*).

Исследования последних лет также сосредоточены на использовании в качестве полимерных матриц биополимеров из-за их низкой стоимости, биосовместимости и широкой доступности [63]. Синтезированные водорастворимые полимеры полиэтиленгликоля, содержащие реакционноспособные фрагменты катехола, полученные из белков природных мидий, высвобождают серебро непрерывно, в течение, по крайней мере, двух недель в фосфатно-солевом буферном растворе, тем самым препятствуя росту бактерий [64].

Желатиновые гидрогелевые подушечки, наполненные наночастицами серебра, показали высокую эффективность против *S. aureus*, *E. coli* и *P. aeruginosa* [65]. Учитывая почти полное наблюдаемое ингибирование роста бактерий при действии композита, можно говорить о его перспективности для разработки основы антибактериальных перевязок.

Целлюлозные листы были функционализированы нанокомпозитными этилцианоакрилатными оболочками, включающими наночастицы серебра для антимикробной активности [66]. Наблюдалось значительное снижение количества бактериальных колоний *E. coli* после обработки листов целлюлозы серебряным композитом поли(этил-2-цианоакрилата) по сравнению с контрольным необработанным листом. Такое антибактериальное действие можно объяснить эффектом ионов серебра, высвобождаемых наночастицами Ag, диспергированными в оболочке этилцианоакрилатных волокон.

Наночастицы серебра также могут усиливать антибактериальную и антибиопленочную активность традиционных антибиотиков. Например, наблюдалась синергическая активность между покрытыми цитратом наночастицами серебра различного размера и монобактамовым антибиотиком азтреонамом против биопленок *P. aeruginosa* [67]. Gurunathan et al. проанализировали антибактериальную

и антибиопленочную активность антибиотиков или наночастиц серебра, или их комбинаций против *P. aeruginosa*, *Shigella flexneri*, *S. aureus* и *Streptococcus pneumonia* [68]. Усиление эффективности антибиотиков за счет их комбинации с наночастицами серебра и механизмы наблюдаемого синергизма были описаны в обзоре Wolska et al. [69].

Как видно из представленных в таблице 2 данных, нанокompозиты серебра на основе гуанидиниевых и фосфониевых сополимеров (АГХ- SO_2 , АГХ-ВА, АГХ-ВП и ДААФ-Cl- SO_2) обладают антибактериальной активностью как в отношении грамположительных, так и грамотрицательных микроорганизмов [70, 71]. Более того, следует отметить более высокую бактерицидную активность нанокompозитов по сравнению с исходными сополимерами. В данных композиционных материалах мы наблюдаем синергетический эффект, обусловленный наличием в системе двух компонентов с бактерицидным действием: бактерицидный полимер и наночастицы серебра, обладающие антимикробными свойствами.

Таблица 2

Противомикробная активность нанокompозитов серебра [70, 71]

Минимальная ингибирующая концентрация (МИК), мкг/мл	Наименование вида (штамма) микроорганизма			
	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	<i>Staphylococcus epidermidis</i> 33	<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 6633	<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922
Ag-АГХ- SO_2	3.9	7.8	125	62.5
Ag-АГХ-ВА	31.2	7.8	15.6	62.5
Ag-АГХ-ВП	31.2	15.6	15.6	125
Ag-ДААФ-Cl- SO_2	7.8	3.9	31.2	31.2

Высокая бактерицидная активность синтезированных нанокompозитов позволяет назвать их многообещающими для изучения влияния данных нанокompозитов на бактериальные биопленки.

Поиск новых антимикробных агентов в отношении бактериальных биопленок в настоящее время вызывает огромный интерес исследователей, так как данный способ существования бактерий создает большие проблемы в медицине и здравоохранении. Образование микробных биопленок, способных колонизировать практически любую ткань и поверхность, повышает вирулентность и патогенность всех возбудителей и способствует развитию более 80% всех инфекций, особенно в случаях, обусловленных применением медицинских инструментов и оборудования (катетеров, линз, протезов). Следует отметить возможность образования биопленок на различных органах и тканях в организме человека и животных, а также на частях растений. Более высокая устойчивость (до 1000 раз) бактерий внутри биопленок к антибиотикам и другим биоцидам затрудняет борьбу с инфекциями, обусловленными различными патогенами. Очевидно, что повышение эффективности лечения невозможно без тестирования бактерицидных агентов на способность проникать в биопленки, действовать на уже сформированные сообщества и угнетать их образование и расселение.

В последние годы пристальное внимание уделено влиянию соединений серебра на биопленки бактерий. Авторами [72] была показана возможность препятствовать

бактериальному пленкообразованию за счет введения соединений серебра в различные материалы. Пионерские исследования по взаимодействию между наночастицами серебра и биопленками бактерий были проведены Fabrega с соавторами [73]. Взаимодействие биопленки *P. putida* (сформированной в течение 24 ч) с серебряными наночастицами (размером 65 ± 30 нм) привело к заметному снижению биомассы биопленки. Авторами [74] была показана высокая эффективность наночастиц серебра в отношении биопленок *P. aeruginosa* PA01.

Наночастицы серебра показали свою активность также в отношении микобактериальных биопленок [75]. Наиболее чувствительна к наночастицам серебра была *M. Smegmatis*, концентрация наночастиц серебра $100 \mu\text{M}$ вызывает разрушение биопленок на 98.7% за 48 часов. Показана возможность на 97.3% разрушить биопленку *M. avium* при концентрации наночастиц серебра $539 \mu\text{M}$ за аналогичное время.

Стабилизированные гидролизрованными пептидами казеина наночастицы серебра диаметром 8 нм значительно ингибируют пленкообразование *E. coli*, *P. aeruginosa* и *Serratia proteamaculans* в концентрациях 4–5, 10 и 10–20 мг/мл соответственно [76]. При использовании стабилизированных крахмалом наночастиц серебра размером 20 нм уже при очень низких концентрациях 1–2 мМ наблюдается ингибирование пленкообразования *P. Aeruginosa* и *S. aureus* на 65 и 88%, соответственно [77]. Связывание наночастиц серебра с β -циклодекстрином улучшает их эффективность в отношении *S. epidermidis* CSF 41498, уменьшает пленкообразование и их цитотоксичность [78].

В работе [79] приведены данные о высоком антимикробном действии биологически синтезированных наночастиц серебра размером 50 нм. Установлено, что при их концентрации 100 нМ возможно практически полностью ингибировать пленкообразование *S. epidermidis* и *P. aeruginosa*. Количественные результаты по действию серебряных наночастиц на пленкообразование устойчивых к метициллину *S. aureus* и *S. epidermidis*, выделенных из ран, были получены Ansari [80].

Исследовано влияние серебряных нанокомпозитов на основе сополимеров АГХ-ВП и АГХ-ВА [81], показана их высокая антибиопленочная активность. В связи с этим возник вопрос: вносит ли гуанидиновая группа сополимера вклад в ингибирование биопленки? На рисунке 1 показано влияние сополимеров и их нанокомпозитов на процесс формирования биопленок *S. epidermidis* 33. Видно, что заметное уменьшение

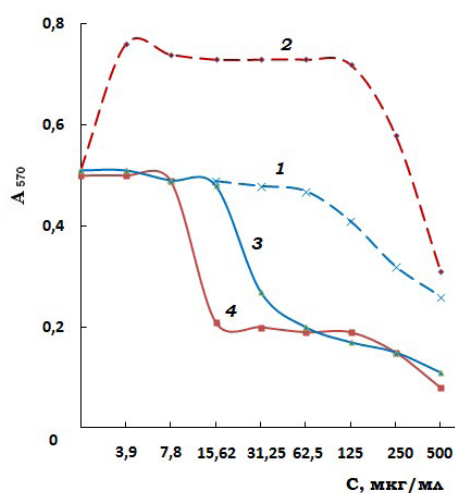


Рис. 1. Влияние сополимеров (1,2) и нанокомпозитов (3,4) на формирование биопленки *S. epidermidis* 33 [81]: АГХ-ВП (1,3); АГХ-ВА (2,4)

бактериальной массы в биопленке наблюдается при концентрации серебряного нанокompозита на основе АГХ-ВА 15.62 мкг/мл, на основе АГХ-ВП 125 мкг/мл. Учитывая тот факт, что сополимеры практически не препятствуют формированию биопленки, можно говорить о значительной роли наночастиц серебра в предотвращении пленкообразования.

При изучении влияния сополимеров и нанокompозитов на уже образованные в течение 24 часов биопленки *S. epidermidis* 33 было установлено, что обработка биопленок сополимером АГХ-ВА в концентрации более 62.5 мкг/мл приводит к разрушению более половины биомассы биопленки, а введение АГХ-ВП в концентрациях выше 250 мкг/мл позволяет почти полностью разрушить сформированную биопленку *S. epidermidis* 33 (Рис. 2). Это указывает на вклад гуанидиновой группы сополимеров в деструкцию биопленок.

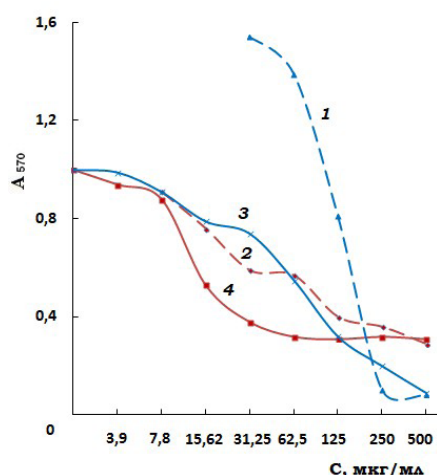


Рис. 2. Влияние сополимеров (1,2) и нанокompозитов (3,4) на сформированную в течение 24 ч биопленку *S. epidermidis* 33 [81]: АГХ-ВП (1,3); АГХ-ВА (2,4)

Аналогичная картина наблюдается в случае фосфониевого сополимера ДААФ-Cl-SO₂. До 30% сформированных в течение 24 ч биопленок *S. epidermidis* 33 могут быть разрушены при использовании фосфониевого сополимера ДААФ-Cl-SO₂ и его серебряного нанокompозита в концентрации 1000 мкг/мл, причем антибиопленочный эффект полисульфона и серебряного нанокompозита одинаков [71]. Это подтверждает заметную роль биоцидных фосфониевых полимеров в разрушении сформировавшихся биопленок *S. epidermidis* 33.

Таким образом, представлен обзор полимерных материалов, содержащих гуанидиновые и фосфониевые группы, и показано их бактерицидное действие в отношении широкого ряда бактерий и грибов. На основе сополимеров гуанидиниевых и фосфониевых солей синтезированы нанокompозиты серебра, обладающие антимикробным действием, в том числе препятствующие формированию биопленок и разрушающие уже сформированные биопленки. Полученные нанокompозиты могут рассматриваться в качестве платформы для разработки новых антимикробных агентов.

Библиографический список

1. Химическая энциклопедия / И.Л. Кнунянц (ред.) – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1.
2. Gilbert, P. Cationic antiseptics: diversity of action under a common epithet / P. Gilbert, L.T. Moore // J Appl Microbiol. – 2005. – V. 99. – P. 703–715.

3. *Menyashev, M.R.* Guanidine Methacrylate and Methacryloyl Guanidine Hydrochloride: Synthesis and Polymerization / M.R. Menyashev, A.I. Martynenko, N.I. Popova, N.A. Kleshcheva, N.A. Sivov // Polym. sci. B. – 2016. – V. 58, № 5. – С. 556-563.
4. *Sivov, N.A.* Biocide and toxicological properties of synthesized guanidine containing polymers and their structure. / N.A. Sivov, S.Y. Khashirova, Yu.A. Malkanduev, M.H. Baidaeva, A.I. Sarbasheva, A.A. Zhansitov, O.A. Taov // Modern tendencies in organic and bioorganic chemistry. Eds. Mikitaev A., Ligidov M. Kh., Zaikov G. E. – New York: Nova Science Publishers, 2008. – Ch. 27. – P. 335-340.
5. *Данилина, Н.И.* Способ получения полимера гексаметиленгуанидина / Н.И. Данилина, П.А. Гембицкий, О.Ю. Кузнецов, Т.В. Воронина // А. с. 1808832 СССР, заявл. 17.08.89; опубл. 15.04.93, Бюл. № 14. – 4 с.
6. *Гембицкий, П.А.* О синтезе поли(алкиленгуанидинов) и поли (алкиленбигуанидинов) / П.А. Гембицкий, Я.А. Корявов, Н.М. Ерусалимский, В.Е. Лиманов, Д.С. Жук // Журнал прикладной химии. – 1975. – Т. 48, № 8. – С. 1833-1836.
7. *Zhang, Y.* Synthesis and antimicrobial activity of polymeric guanidine and biguanidine salts / Y. Zhang, J. Jiang, Y. Chen // Polymer. – 1999. – V. 40. – P. 6189-6198.
8. *Broxton, P.* A study of the antibacterial activity of some polyhexamethylene biguanides towards *Escherichia coli* ATCC 8739 / P. Broxton, P.M. Woodcock, P. Gilbert // J. Appl. Bacteriol. – 1983. – V. 54(3). – P. 345-353.
9. *Broxton, P.* Binding of polyhexamethylene biguanides to the cell envelope of *Escherichia coli* ATCC 8739 / P. Broxton, P.M. Woodcock, P. Gilbert // Microbios. – 1984. – V. 41(163). – P. 15-22.
10. *Broxton, P.* Interaction of some polyhexamethylene biguanides and membrane phospholipids in *Escherichia coli* / P. Broxton, P.M. Woodcock, F. Heatley, P. Gilbert // J. Appl. Bacteriol. – 1984. – V. 57(1). – P. 115-124.
11. *Ikeda, T.* Synthesis and Antibacterial Activities of Polycations with Pendant Biguanide Groups, New Polymeric Biocides / T. Ikeda, H. Yamaguchi, Sh. Tazuke // Antimicrob. Agents Chemother. – 1984. – V. 26. – P. 139-144.
12. *Ikeda, T.* Interaction of polymeric biguanide biocide with phospholipid membranes/ T. Ikeda, A. Ledwith, C.H. Bamford, R.A. Hann // Biochim. Biophys. Acta. – 1984. – V. 769(1). – P.57-66.
13. *Ikeda, T.* Antibacterial Activity of Polycationic Biocides / T. Ikeda // High Performance Biomaterials, M. Szycher, ed., Lancaster: Technomic Pub., 1991. – Ch. 42.
14. *Zhou, Zh.* Extensive in vitro activity of guanidine hydrochloride polymer analogs against antibiotics-resistant clinically isolated strains / Zh. Zhou, D. Wei, Y. Guan, A. Zheng, J.-J. Zhong // Mater. Sci. Engineering C. – 2011. – V. 31(8). – P. 1836–1843.
15. *Oule', M.K.* Polyhexamethylene guanidine hydrochloride-based disinfectant: a novel tool to fight meticillin-resistant *Staphylococcus aureus* and nosocomial infections / M.K. Oule', R. Azinwi, A.-M. Bernier, T. Kablan, A.-M. Maupertuis, S. Mauler, R.K. Nevry, K. Dembe' le', L. Forbes, L. Diop // J. Med. Microbiol. – 2008. – V. 57(12). – P. 1523–1528.
16. *McDonnell, G.* Antiseptics and disinfectants: activity, action, and resistance / G. McDonnell, A.D. Russell // Clin. Microbiol. Rev. – 1999. – V. 12. – P. 147–179.
17. *Qian, L.* Modified guanidine polymers: Synthesis and antimicrobial mechanism revealed by AFM / L. Qian, Y. Guan, B. He, H. Xiao // Polymer. – 2008. – V. 49. – P. 2471-2475.
18. *Гембицкий П.А., Воинцева И.И.* Полимерный биоцидный препарат полигексаметиленгуанидин. Запорожье: Полиграф, 1998. – 43 с.
19. *Ефимов, К.М.* Полигуанидины – класс малотоксичных дезсредств пролонгированного действия / К.М. Ефимов, П.А. Гембицкий, А.Г. Снежко // Дезинфекционное дело. – 2000. – № 4. – С. 32-36.
20. *Zhang, H.* Synthesis and Application of Guanidine-Based Antibacterial Polymers / H. Zhang, J. Liu, K. Cui, T. Jiang, Zh. Ma // Progress in Chemistry. – 2019. – V. 31(5). – P. 681-689.
21. *Gorbunova, M.N.* Guanidine-containing polymers / M.N. Gorbunova // Encyclopedia of Biomedical Polymers and Polymeric Biomaterials. NY: Taylor&Francis Group, 2015. – P. 3672-3680.

22. *Kratzer, C.* In vivo activity of a novel polymeric guanidine in experimental skin infection with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* / C. Kratzer, S. Tobudic, K. Macfelda, W. Graninger, A. Georgopoulos // Antimicrobial agents and chemotherapy. – 2007. – V. 51(9). – P. 3437–3439.
23. *Хаширова, С. Ю.* Гуанидинсодержащие полимеры и нанокомпозиты на их основе: дисс. докт. хим. наук: 02.00.06 / Хаширова Светлана Юрьевна. – Нальчик, 2009. – 287 с.
24. *Mattheis, C.* Effect of guanidinylation on the properties of poly(2-aminoethylmethacrylate)-based antibacterial materials / C. Mattheis, H. Wang, C. Meister, S. Agarwal // Macromol. Biosci. – 2013 – V. 13. – P. 242–255.
25. *Wang, H.* Oligomeric dual-functional antibacterial polycaprolactone / H. Wang, C.V. Synatschke, A. Raup, V. Jerome, R. Freitag, S. Agarwal // Polym. Chem. – 2014. – V. 5. – P. 2453–2460.
26. *Locock, K.E.S.* Antimicrobial polymethacrylates synthesized as mimics of tryptophan-rich cationic peptides / K.E.S. Locock, T.D. Michl, N. Stevens, J.D. Hayball, K. Vasilev, A. Postma, H.J. Griesser, L. Meagher, M. Haeussler // ACS Macro Lett. – 2014. – V. 3. – P. 319–323.
27. *Gabriel, G.J.* Synthetic mimic of antimicrobial peptide with nonmembrane-disrupting antibacterial properties / G.J. Gabriel, A.E. Madkour, J.M. Dabkowski, C.F. Nelson, K. Nusslein, G.N. Tew // Biomacromolecules. – 2008. – V. 9. – P. 2980–2983.
28. *Тлупова, З.А.* Новые композиционные материалы на основе диальдегидцеллюлозы и гуанидинсодержащих соединений: дисс. канд. хим. наук: 02.00.06 / Тлупова Залина Алексеевна. – Нальчик, 2013. – 139 с.
29. *Ахмедов, О.Р.* Изучение химического взаимодействия модифицированных полисахаридов с гуанидином / О.Р. Ахмедов, Ш.А. Шомуротов, А.С. Тураев // Современные актуальные проблемы естественных наук: материалы Международной научно-практической интернет-конференции. Актобе, Казахстан, 2014. – Т. 1. – С. 98–101.
30. *Qian, L.Y.* Preparation of guanidine derivative polymers as novel functional additives for value-added hygiene paper / L.Y. Qian, Y. Guan, H.N. Xiao // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 236-238. – P. 2993-2996.
31. *Qian, L.* Preparation of guanidine polymer and its complex as dual-functional agent for cellulose fibre-based hygiene products / L. Qian, X. Li, Sh. Sun, H. Xiao // Journal of Biobased Materials and Bioenergy – 2011. – V. 5(2). – P. 219-224.
32. *Gorbunova, M.N.* New N-allylated monomers in the synthesis of practical valuable high-molecular-weight compounds / M.N. Gorbunova, A.I. Vorob'eva, A.G. Tolstikov, Yu.B. Monakov // Polymers for Advanced Technologies. – 2009. – V. 20, № 3. – P. 209 – 215.
33. *Горбунова, М.Н.* Сополимеризация 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиний хлорида с винилацетатом / М.Н. Горбунова, Т.Е. Ощепкова // Высокомолек. соед. Б. – 2009. – Т. 51, № 9. – С. 1830 – 1835.
34. *Горбунова, М.Н.* Сополимеризация 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиний хлорида с N-замещенными малсимидами / М.Н. Горбунова // Высокомолек. соед. Б. – 2010. – Т. 52, № 8. – С. 1515-1522.
35. *Горбунова, М.Н.* Сополимеризация N-винилпирролидона с новыми аллиловыми мономерами / М.Н. Горбунова // Журн. приклад. химии. – 2010. – Т. 83, № 8. – С. 1324-1329.
36. *Горбунова, М.Н.* Сополимеризация 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиний хлорида с малеиновой кислотой / М.Н. Горбунова, В.И. Карманов // Высокомолек. соед. Б. – 2011. – Т. 53, № 4. – С. 593-596.
37. *Nikaido, H.* Molecular basis of bacterial outer membrane permeability / H. Nikaido, M. Vaara // Microbiology Review. – 1985. – V. 49. – P. 1-32.
38. *Gilbert, P.* Barrier properties of the Gram-negative cell envelope towards high molecular weight polyhexamethylene biguanides / P. Gilbert, D. Pemberton, D.E. Wilkinson // J. Appl. Bacter. – 1990. – V. 69. – P. 585-592.
39. *Kenawy, E.R.* Biologically active polymers: synthesis and antimicrobial activity of modified glycidyl methacrylate polymers having a quaternary ammonium and phosphonium groups / E.R. Kenawy, F.I. Abdel-Hay, A.R. El-Shanshoury, M.H. El-Newehy // J. Controlled Rel. – 1998. – V. 50. – P. 145-152.

40. Kanazawa, A. Polymeric phosphonium salts as a novel class of cationic biocides. III. Immobilization of phosphonium salts by surface photografting and antibacterial activity of the surface-treated polymer films / A. Kanazawa, T. Ikeda, T. Endo // J. Polym. Sci. A. Polym. Chem. – 1993. – V. 31, № 6. – P. 1467-1472.
41. Kanazawa, A. Antibacterial activity of polymeric sulfonium salts / A. Kanazawa, T. Ikeda, T. Endo // J. Polym. Sci. A. Polym. Chem. – 1993. – V. 31, № 11. – P. 2873-2876.
42. Kanazawa, A. Polymeric phosphonium salts as a novel class of cationic biocides. IX. Effect of side-chain length between main chain and active group on antibacterial activity / A. Kanazawa, T. Ikeda, T. Endo // J. Polym. Sci. A. Polym. Chem. – 1994. – V. 32, № 10. – P. 1997-2001.
43. Kanazawa, A. Polymeric phosphonium salts as a novel class of cationic biocides. II. Effects of counter anion and molecular weight on antibacterial activity of polymeric phosphonium salts / A. Kanazawa, T. Ikeda, T. Endo // J. Polym. Sci. A. Polym. Chem. – 1993. – V. 31, № 6. – P. 1441-1447.
44. Anthierens, T. Poly(butylene adipate) functionalized with quaternary phosphonium groups as potential antimicrobial packaging material / T. Anthierens, L. Billiet, F. Devlieghere, F. Du Prez // Innov. Food. Sci. Emerg. – 2012. – V. 15. – P. 81–85.
45. Preparation of quaternary phosphonium salt ionic polymer for antibacterial plastic / China Petroleum & Chemical Corporation; SINOPEC (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd. // Patent CN 121673452 A. 17.03.2026.
46. Preparation method of quaternary phosphonium salt-based ionic polymer for antibacterial agent / China Petroleum & Chemical Corporation; SINOPEC (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd. // Patent CN 121673453 A. 17.03.2026.
47. Ogura, H. Recognition and separation of Gram-positive and Gram-negative bacteria using polythiophene derivatives with phosphonium groups / H. Ogura, R. Kuroda, N. Kanazawa, T. Hayashita, M. Yoshizawa-Fujita, M. Rikukawa, Y. Takeoka // Analytical Methods. – 2026. – V. 18(2). – P. 282-286.
48. Ogura, H. Tuning self-organization of phosphonium-functionalized polythiophenes for selective recognition and separation of gram-positive and gram-negative bacteria / H. Ogura, R. Kuroda, N. Kanazawa, T. Hayashita, M. Yoshizawa-Fujita, M. Rikukawa, Y. Takeoka // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 2026. – V. 99(4). – P. uoag050.
49. Cui, W. Novel antibacterial pullulan derivatives modified with quaternary phosphonium salts for infected wound treatments / W. Cui, Y. Liu, Y. Yue, J. Wang, X. Meng, Zh. Yang, Ch. Gong, J.-L. Yang // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – V. 282(2). – P. 136893.
50. Gorbunova, M.N. Polysulfones on the base of new dialkylaminophosphonium salts / M.N. Gorbunova, A.I. Vorob'eva // Macromolecular Symposia. – 2010. – V. 298. – P. 160-166.
51. Крутяков, Ю.А. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Ю.А. Крутяков, А.А. Кудринский, А.Ю. Оленин, Г.В. Лисичкин // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 3. – С. 242-269.
52. Pal, S. Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the Gram-negative bacterium Escherichia coli / S. Pal, Y.K. Tak, J.M. Song // Appl. Environ. Microbiol. – 2007. – V. 73, № 6. – P. 1712 -1720.
53. Bajpai, S.K. Synthesis of polymer stabilized silver and gold nanostructures / S.K. Bajpai, Y.M. Mohan, M. Bajpai, R. Tankhiwale, V.J. Thomas // Nanosci. Nanotechnol. – 2007. – V. 7. – P. 2994–3010.
54. Kong, H. Antibacterial properties of novel poly(methyl methacrylate) nanofiber containing silver nanoparticles / H. Kong, J. Jang // Langmuir. – 2008. – V. 24. – P. 2051–2056.
55. Sharma, V.K. Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities / V.K. Sharma, R.A. Yngard, Y. Lin // Adv. Colloid Interface Sci. – 2009. – V. 145. – P. 83–96.
56. Thomas, V. A new generation of high flex life polyurethane urea for polymer heart valve – studies on in vivo biocompatibility and biodurability / V. Thomas, M. Jayabalan // J. Biomed. Mater. Res. A. – 2009. – V. 89. – P. 192–205.
57. Vimala, K. Fabrication of porous chitosan films impregnated with silver nanoparticles: a facile approach for superior antibacterial application / K. Vimala, Y.M. Mohan, K.S. Sivudu, K. Varaprasad,

- S. Ravindra, N.N. Reddy, Y. Padma, B. Sreedhar, K. MohanaRaju // *Colloids Surf. B. Biointerfaces.* – 2010. – V. 76. – P. 248–258.
58. *Juby, K.A.* Silver nanoparticle-loaded PVA/gum acacia hydrogel: synthesis, characterization and antibacterial study / K.A. Juby, C. Dwivedi, M. Kumar, S. Kota, H.S. Misra, P.N. Bajaj // *Carbohydr. Polym.* – 2012. – V. 89. – P. 906–913.
59. *Vasilev, K.* Tunable antibacterial coatings that support mammalian cell growth / K. Vasilev, V. Sah, K. Anselme, C. Ndi, M. Mateescu, B. Dollmann, P. Martinek, H. Ys, L. Ploux, H.J. Griesser // *NanoLett.* – 2010. – V. 10. – P. 202–207.
60. *Oertel G.* Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties / Hanser Gardner Publications, OH, USA, 1994. – 688 p.
61. *Shah, M.S.A.S.* Silver on PEG–PU–TiO₂ polymer nanocomposite films: an excellent system for antibacterial applications / M.S.A.S. Shah, M. Nag, T. Kalagara, S. Singh, S.V. Manorama // *Chem. Mater.* – 2008. – V. 20. – P. 2455–2460.
62. *Melaiye, A.* Silver(I)-imidazole cyclophane gem-diol complexes encapsulated by electrospun tectophilic nanofibers: formation of nanosilver particles and antimicrobial activity / A. Melaiye, Z. Sun, K. Hindi, A. Milsted, D. Ely, D.H. Reneker, C.A. Tessier, W.J. Youngs // *J. Am. Chem. Soc.* – 2005. – V. 127. – P. 2285–2291.
63. *Kaplan D.L.* Biopolymers from Renewable Resources / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, NY, USA, 1998. – 438 p.
64. *Fullenkamp, D.E.* Mussel-inspired silver-releasing antibacterial hydrogels / D.E. Fullenkamp, J.G. Rivera, Y.K. Gong, K.A. Lau, L. He, R. Varshney, P.B. Messersmith // *Biomaterials.* – 2012. – V. 33. – P. 3783–3791.
65. *Rattanaaruengsrikul, V.* In vitro efficacy and toxicology evaluation of silver nanoparticle-loaded gelatin hydrogel pads as antibacterial wound dressings / V. Rattanaaruengsrikul, N. Pimpha, P. Supaphol // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2012. – V. 124. – P. 1668–1682.
66. *Bayer, I.S.* Water-repellent cellulose fiber networks with multifunctional properties / I.S. Bayer, D. Fragouli, A. Attanasio, B. Sorce, G. Bertoni, R. Brescia, R. Di Corato, T. Pellegrino, M. Kalyva, S. Sabella, P. Paolo Pompa, R. Cingolani, A. Athanassiou // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2011. – V. 3(10). – P. 4024–4031.
67. *Habash, M.B.* Synergy of silver nanoparticles and aztreonam against *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 biofilms / M.B. Habash, A.J. Park, E.C. Vis, R.J. Harris, C.M. Khursigara // *Antimicrob. Agents chemother.* – 2014. – V. 58. – P. 5818–5830.
68. *Gurunathan, S.* Enhanced antibacterial and anti-biofilm activities of silver nanoparticles against Gram-negative and Gram-positive bacteria / S. Gurunathan, J.W. Han, D.N. Kwon, J.H. Kim // *Nanoscale Res. Lett.* – 2014. – V. 9. – P. 373.
69. *Wolska, K.I.* Synergy between novel antimicrobials and conventional antibiotics or bacteriocins / K.I. Wolska, K. Grześ, A. Kurek // *Pol J Microbiol* – 2012. – V. 61. – P. 95–104.
70. *Gorbunova, M.N.* New biocide guanidine-containing nanocomposites / M.N. Gorbunova, L.M. Lemkina // *J. Nanopart. Research.* – 2014. – V. 16, № 8. – P. 2566.
71. *Gorbunova, M.* Guanidinium and phosphonium scaffolds loaded with silver nanoparticles: synthesis, characterization, *in vitro* assessment of the antibacterial potential and toxicity / M. Gorbunova, L. Lemkina, A. Nechaev // *J. Inorg. Organomet. Polym.* – 2021. – V. 31(5). – P. 2218–2232.
72. *Chopra, I.* The increasing use of silver-based products as antimicrobial agents: A useful development or a cause for concern? / I. Chopra // *J. Antimicrob. Chemother.* – 2007. – V. 59. – P. 587–590.
73. *Fabrega, J.* Interactions of silver nanoparticles with *Pseudomonas putida* biofilms / J. Fabrega, J.C. Renshaw, J.R. Lead // *Environ. Sci. Technol.* – 2009. – V. 43. – P. 9004–9009.
74. *Park, H.J.* Biofilm-inactivating activity of silver nanoparticles: A comparison with silver ions / H.J. Park, S. Park, J. Roh, S. Kim, K. Choi, J. Yi, J. Kim, J. Yoon // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2013. – V. 19. – P. 614–619.

75. *Islam, M.S.* Antimycobacterial efficacy of silver nanoparticles as deposited on porous membrane filters / M.S. Islam, C. Larimer, A. Ojha, I. Nettleship // *Mater Sci Eng. C.* – 2013. – V. 33. – P. 4575–4581.
76. *Radzig, M.A.* Antibacterial effects of silver nanoparticles on gram-negative bacteria: Influence on the growth and biofilms formation, mechanisms of action / M.A. Radzig, V.A. Nadtochenko, O.A. Koksharova, J. Kiwi, V.A. Lipasova, I.A. Khmel // *Colloids Surf B. Biointerfaces.* – 2013. – V. 102. – P. 300–306.
77. *Mohanty, S.* An investigation on the antibacterial, cytotoxic, and antibiofilm efficacy of starch-stabilized silver nanoparticles / S. Mohanty, S. Mishra, P. Jena, B. Jacob, B. Sarkar, A. Sonawane // *Nanomed Nanotechnol.* – 2012. – V. 8. – P. 916–924.
78. *Jaiswal S.* Dual effects of beta-cyclodextrin-stabilised silver nanoparticles: Enhanced biofilm inhibition and reduced cytotoxicity / S. Jaiswal, K. Bhattacharya, P. McHale, B. Duffy // *J Mater Sci. Mater Med.* – 2015. – V. 26, № 21. – P. 52.
79. *Kalishwaralal, K.* Silver nanoparticles impede the biofilm formation by *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus epidermidis* / K. Kalishwaralal, S. BarathManiKanth // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* – 2010. – V. 79, № 5. – P. 340–344.
80. *Ansari, M.A.* Anti-biofilm efficacy of silver nanoparticles against MRSA and MRSE isolated from wounds in a tertiary care hospital / M.A. Ansari, H.M. Khan, A.A. Khan, S.S. Cameotra, M.A. Alzohairy // *Indian J Med Microbiol.* – 2015. – V. 33, №11. – P. 101–109.
81. *Gorbunova, M.N.* New guanidine-containing nanocomposites impeding the growth of *Staphylococcus epidermidis* 33 and the biofilm formation / M.N. Gorbunova, L.M. Lemkina // *J. Biomed Mat Research. A.* – 2016. – V. 104, № 3. – P. 630–638.

Благодарности:

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № 124021400012-1).

Автор благодарит Центр коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук «Исследование материалов и вещества» за аналитические и спектральные исследования.

Автор благодарит Лемкину Л.М. за проведение биологических экспериментов.

Для цитирования:

Горбунова М.Н. Бицидные гуанидиниевые и фосфониевые полимерные материалы // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 102–117. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.7>

Сведения об авторе:

Горбунова Марина Николаевна, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биологически активных соединений, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 6140068, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 3; e-mail: mngorb@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2639-6069

BIOCIDAL GUANIDINIUM AND PHOSPHONIUM POLYMERIC MATERIALS

Gorbunova M.N.

Institute of Technical Chemistry UB RAS, Perm

This review presents examples of phosphonium- and guanidine-containing polymers that were previously obtained in Russia and abroad. It is known that introducing guanidinium and

phosphonium groups into polymers imparts high antimicrobial activity to the materials based on them. Unique monomers, 2,2-diallyl-1,1,3,3-tetraethylguanidinium and tris(diethylamino) diallylaminophosphonium chlorides, synthesized for the first time at the Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, hold promise for the production of new biocidal polymers. These monomers were used to obtain new biocidal copolymers: quantitative physicochemical mechanisms of polymer formation processes were studied, and the potential for regulating the structure, composition, molecular weights, and biocidal properties was determined. The paper presents the resulting polymeric materials and demonstrates the great potential of polymer salts as bactericides and antiseptics. Synthesized copolymers based on guanidinium and phosphonium salts were also considered as nanostabilizing matrices for silver particles due to the presence of functional groups in the copolymers that contribute to the effective stabilization of metal nanoparticles. The resulting polymeric materials, due to their synergistic enhancement of biocidal properties, exhibit high bactericidal activity and hold great promise for the development of agents to combat bacterial biofilms.

Keywords: *guanidinium salt, phosphonium salts, copolymers, nanocomposites, bactericides*

Поступила в редакцию: 02.06.2026

Принята к публикации: 13.07.2026

ЛЕВЗЕЯ САФЛОРОВИДНАЯ КАК ИСТОЧНИК КОРМОВОЙ ФИТОДОБАВКИ ДЛЯ МОЛОДНЯКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ

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

Лепихина Е.В., Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Пермь

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

Исследование оценивало влияние фитодобавки на основе левзеи сафлоровидной в различных дозах на продуктивность цыплят-бройлеров по сравнению с контрольной группой на традиционном рационе, применяемом на предприятии. Цель эксперимента состояла в оценке влияния различных доз левзеи сафлоровидной, добавленной в состав основной кормосмеси, на баланс усвоения некоторых макроэлементов у молодняка птицы и на показатели прироста. Общее число птиц в экспериментальных группах было равно 140, в возрасте 14 дней, в каждой группе по 35 голов ($n=35$). Контрольная группа получала базовый рацион (БР), а 3 опытные группы питались следующим образом: к базовому рациону скармливали добавку в объеме 1,60%, 2,10%, 2,60% от рациона. Результаты исследований показали положительный баланс азота у цыплят-бройлеров в опытных группах. Скармливание фитодобавки на основе левзеи сафлоровидной способствовало улучшению усвояемости протеина корма, что привело к увеличению привеса молодняка птицы. Внесение испытываемой фитодобавки в состав комбикормов не оказало отрицательного воздействия на минеральный состав экспериментальной птицы. В ходе исследований лучшую биодоступность демонстрировали макроэлементы, поступающие из комплексных источников, в том числе из фитодобавки на основе левзеи сафлоровидной, что выражалось в более эффективном использовании азота и кальций-фосфорного компонента корма. У цыплят-бройлеров, получавших левзею сафлоровидную в базовом рационе, абсолютный прирост живой массы оказался на 2,62-15,25% выше контрольного варианта. Влияние на продуктивность бройлеров зависело от дозировки, и наиболее эффективным оказалось добавление левзеи сафлоровидной в максимальной дозе (5 г. порошка в кормосмесь).

Ключевые слова: молодняк птицы, биологически активные вещества (БАВ), кормовая фитодобавка, левзея сафлоровидная, фитоэкдистероиды, сохранность, рост и продуктивность

Актуальность

В настоящее время внимание общественности и регулирующих органов к здоровью, благополучию сельскохозяйственной птицы, а также устойчивому производству птицеводческой продукции вызвало интерес к использованию растений, содержащих биологически активные вещества (пробиотики, органические вещества, экдистероиды и др.). Питание является жизненно важным фактором для оптимального ухода за домашней птицей, поскольку оно напрямую влияет на здоровье птицы, а также на качество мяса и яйца. Использование различных растений в качестве биологически активных веществ в рационе молодняка и взрослого поголовья рассматривалось как потенциальный способ повышения темпов роста и снижения смертности сельскохозяйственных животных.

На протяжении более 70 лет антибиотики применялись в малых дозах для лечения и стимулирования роста домашней птицы. Рационы без антибиотиков-стимуляторов

роста являются наиболее важным фактором экологически безопасного производства кормов в птицеводстве. Птица мясного направления, выращиваемая в условиях интенсивного производства, становится более восприимчивой к колебаниям различных факторов внешней и внутренней среды, что снижает ее продуктивность и качество продукции. Поэтому появление добавок на растительной основе в кормлении повлияет на рост, качество и здоровье промышленной птицы. Лекарственные растения считаются подходящей альтернативой противомикробным препаратам [1,2].

В связи с этим использование растительных компонентов в базовых рационах для промышленного птицеводства потенциально может стать альтернативой улучшения биобезопасности при отказе от стимуляторов роста на основе антибиотиков в кормлении птицы.

Большинство растений обладает полезными многофункциональными свойствами, обусловленными наличием в них определенных биологически активных компонентов. Предыдущие исследования показали, что активные компоненты лекарственных растений могут улучшить сохранность, рост и продуктивность промышленной птицы. Также было обнаружено, что использование растительных компонентов в рационе птицы повышает продуктивность и иммунитет [3, 4; 3].

Rhaponticum carthamoides (Willd.) Iljin – международное научное название левзеи сафлоровидной из семейства сложноцветных Asteraceae. Левзея сафлоровидная используется как в свежем, так и в сушёном виде для различных целей. Исследованиями ряда учёных установлено, что основным биологически активным веществом рапонтикума сафлоровидного является гидроксиэкдизон. Исследование, проведенное в 2019 году при финансовой поддержке Всемирного антидопингового агентства, показало, что 20-гидроксиэкдизон, содержащийся в *R. Carthamoides* является нетрадиционным анаболическим средством, способным значительно увеличить мышечную массу.

Левзея сафлоровидная обладает иммуномодулирующими свойствами, что благотворно влияют на рост и здоровье животных, в том числе птицы. Было установлено, что при прямом действии экдистеронсодержащая добавка повлияла на ускорение роста на 40,6% и снижение смертности с 22-27 до 9-12% у свиней. Дополнительно к рациону сухую массу из листевой части *R. carthamoides* получал молодняк птиц яичной породы. Был получен анаболический эффект (увеличение массы тела) кур на 136,9% и петушков на 140,0%, а показатель смертности у самцов снизился с 3,73 до 2,5%, у самок – с 3,25 до 2,08% [2, 3].

Лаборатория биологически активных кормов Пермского НИИСХ уже 17 лет (с 2009 года) разрабатывает и испытывает экологически чистые производственные средства на основе растительных компонентов, из-за таких преимуществ, как чистое безопасное сырьё, доступность и отсутствие угрозы устойчивости к антибиотикам.

Учёными лаборатории разработаны рекомендации по использованию кормовых фитодобавок из левзеи сафлоровидной и астрагала нутового в кормлении яичной птицы. Наши исследования дают практические основания для применения фитодобавок в производстве мяса и яиц, что способствует здоровому и устойчивому развитию птицеводства в условиях ограничений на применение антибиотиков [3, 4].

Создание фитокармликовых добавок, содержащих комплексы биологически активных веществ, и их применение к основному рациону для получения

высоких производственных показателей в промышленном птицеводстве приводит к необходимым дальнейшим исследованиям. Получены экспериментальные данные о влиянии фитокормовой добавки, содержащей БАВ из растения левзея сафлоровидная, на основные производственные показатели молодняка птицы мясной породы.

Цель исследований – оценить влияние фитодобавки, содержащей измельчённую массу из листевой части левзеи сафлоровидной, на усвоение баланса азота и основных макроэлементов в организме молодняка птицы мясной породы.

Материалы и методы

Работа была осуществлена в 2025 году на территории ООО «Предуралье» в Пермском районе Пермского края. Опыт проводился методом пар-аналогов по общепринятой методике. Физиологический опыт длился 10 дней. Группы цыплят кросса Росс 308 были выбраны в возрасте 14 дней. Цыплята были распределены на 4 группы по тридцать пять ($n=35$) голов в каждой. Контрольная группа птиц получала комбикорм, соответствующий данному кроссу, 1-й опытной группе давали основной рацион с включением левзеи сафлоровидной 1,60 % (3 г на голову в сутки), а во 2-ю и 3-ю опытные группы – 2,10 % (4 г на голову в сутки) и 2,60 % (5 г на голову в сутки) соответственно. Эксперимент длился 21 день [4, 5].

Условия их содержания и кормления соответствовали параметрам основного эксперимента: температуру регулировали в соответствии с потребностями птицы (18–23 °C), обеспечивалась естественная и механическая вентиляция. Предоставлялся свободный доступ к воде и корму [5, 5].

Молодняку птицы давали кормовые смеси, где в качестве основы был комбикорм ПК-6 с добавлением левзеи сафлоровидной в разных испытуемых дозах. Ингредиенты комбикорма ПК-6 для базового рациона птицы находились в правильных соотношениях, согласно общепринятым рекомендациям.

Таким образом, рациональным технологическим решением стало введение в основной рацион фитодобавки из левзеи сафлоровидной, что позволило повысить усвоение питательных веществ базового корма для продуктивности птицы в положительную сторону.

Выращивание и заготовка зеленой массы левзеи сафлоровидной были выполнены в условиях опытного поля Пермского НИИСХ. Скошенную массу подвергали сушке при температуре 40°C с активным вентилированием, затем перерабатывали на измельчителе сена и соломы ДПМС-15, по окончании была изготовлена фитодобавка, которая представляла собой измельчённый порошок из левзеи сафлоровидной.

Содержание экидистероидов и флавоноидов в надземных частях левзеи сафлоровидной было проанализировано аналитической лабораторией Пермского НИИСХ и кафедрой физиологии растений Пермского государственного национального исследовательского университета.

Данные по приросту массы птицы и усвояемости белка с основными макроэлементами были обработаны статистически. Различия считаются достоверными при следующих уровнях значимости: $*P \leq 0,05$; $**P \leq 0,01$; $***P \leq 0,001$.

Результаты и их обсуждение

В ходе всего периода проведения эксперимента у молодой птицы общее состояние здоровья было удовлетворительным.

Подвижность, дыхание, аппетит, перьевой покров соответствовали нормам здоровой птицы.

Использование экидстероидов из фитодобавки левзеи сафлоровидной способствовало повышению сохранности цыплят во всех экспериментальных группах. За время исследований смертность птицы не была зафиксирована.

Фенольные соединения являются наиболее многочисленной группой вторичных растительных метаболитов в фитодобавке и составляют 4,2 % в пересчете на абсолютно сухое вещество. Содержание биологически активного вещества 20-гидроксиэкидзона в фитодобавке составило 0,4 % в пересчете на действующее вещество. Полученные данные свидетельствуют о высоком потенциале фитодобавки из левзеи сафлоровидной для применения в кормлении птицы.

Изучение показателей баланса азота, полученных в ходе эксперимента с цыплятами-бройлерами, продемонстрировало положительную тенденцию во всех исследуемых группах, однако показатели потребления и удержания различались в зависимости от дозировки фитодобавки из левзеи сафлоровидной.

В контрольной группе цыплята потребляли в среднем 6,27 г азота с кормом, выделяли с помётом 3,20 г, суточный баланс составил +3,07 г, доля использованного азота от принятого – 48,98 %. В 1-й опытной группе (минимальная доза) потребление азота повысилось до 6,85 г, выделение до 3,49 г, баланс увеличился до +3,36 г, использование – до 49,15 %; прирост баланса относительно контроля составил +0,29 г, эффективности – 0,17 п.п., различия статистически не значимы ($P > 0,05$). Во 2-й опытной группе (средняя доза) отмечено достоверное повышение потребления азота до 7,01 г ($P \leq 0,05$), выделение – 3,53 г, баланс +3,48 г, использование – 49,72 %; прирост баланса – +0,41 г, эффективности – +0,74 п.п., однако различия по балансу и использованию не достигли значимости. В 3-й опытной группе (максимальная доза) зафиксировано наиболее высокое и статистически значимое увеличение потребления азота – 7,51 г ($P \leq 0,01$), выделение – 3,73 г, баланс (+3,78 г), также значимо превысил контроль ($P \leq 0,05$), доля использованного азота – 50,37 %, что выше контроля на 1,39 п.п., но из-за вариабельности данных различие не достоверно.

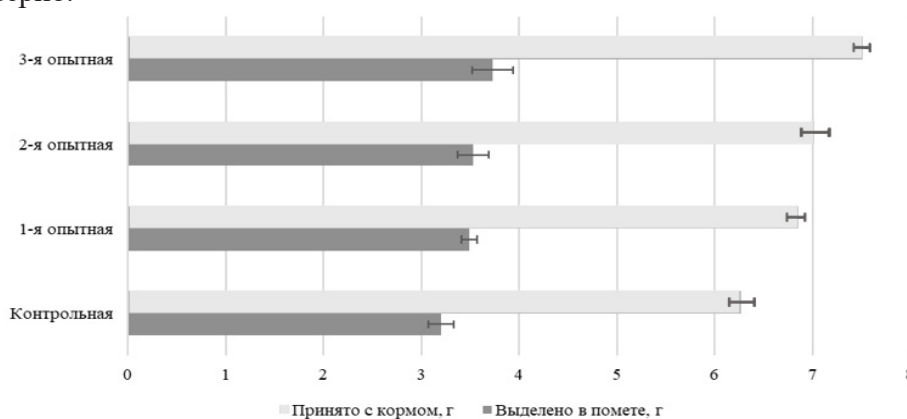


Рис. 1. Баланс и потребление азота кормосмеси цыплятами-бройлерами в опыте за сутки, г ($M \pm t$, $n = 5$)

Таким образом, введение фитодобавки способствовало увеличению потребления азота (особенно при максимальной дозе) и положительного баланса с тенденцией к повышению эффективности утилизации азота с 48,98 % в контроле до 50,37 % в 3-й опытной группе.

Воздействие экспериментальных доз на баланс и потребление кальция цыплятами-бройлерами в опыте отражено на рисунке 2.

Баланс кальция во всех группах положительный, причём с увеличением дозы фитодобавки растёт как потребление, так и абсолютное удержание кальция в организме птицы. В контрольной группе птицы потребление составляло 2,23 г, выделение с помётом – 1,00 г, баланс +1,23 г, использование от принятого – 55,18 %. В 1-й опытной группе потребление увеличилось до 2,43 г, выделение до 1,08 г, баланс до +1,35 г (на 0,12 г выше контроля), использование – 55,71 % (+0,53 п.п.), различия незначимы. Во 2-й опытной группе потребление – 2,48 г, выделение – 1,09 г, баланс +1,39 г, использование – 56,12 % (+0,94 п.п.), тенденция к улучшению сохраняется.

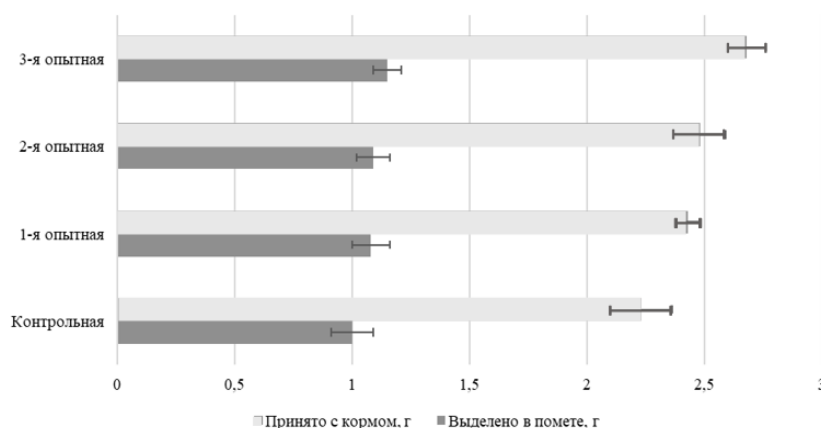


Рис. 2. Баланс и потребление кальция кормосмеси цыплятами-бройлерами в опыте за сутки, г
($M \pm m$, $n = 5$)

В 3-й опытной группе потребление кальция достигло 2,68 г, что достоверно выше контроля ($P \leq 0,05$), выделение – 1,15 г, баланс +1,53 г также значимо выше контрольного ($P \leq 0,05$), использование кальция – 57,03 %, что на 1,85 п.п. выше контроля, однако из-за относительно высокой ошибки среднего (2,56 %) различие статистически не подтверждено. Следовательно, фитодобавка в максимальной дозе привела к значимому повышению потребления и удержания кальция, а наилучшие показатели использования (57,03 %) отмечены именно в 3-й опытной группе, что свидетельствует о положительном влиянии фитодобавки на обмен кальция, вероятно, за счёт улучшения всасывания в кишечнике.

Результаты по балансу и потреблению фосфора опытной птицей представлены на рисунке 3.

Потребление фосфора возрастает параллельно дозе добавки, а выделение увеличивается не столь значительно, что ведёт к росту удерживаемого количества. В контроле потреблено 1,31 г фосфора, выделено с помётом 0,61 г, баланс +0,70 г, доля использованного от принятого – 53,65 %.

В 1-й опытной группе потребление – 1,43 г, выделение – 0,66 г, баланс +0,77 г, использование – 53,94 %; прирост баланса (+0,07 г) и эффективности (+0,29 п.п.) незначителен. Во 2-й опытной группе потребление – 1,46 г, выделение – 0,66 г, баланс +0,80 г, использование – 54,48 % (+0,83 п.п. к контролю), различия статистически не достоверны. В 3-й опытной группе зафиксировано достоверное увеличение потребления фосфора – 1,56 г ($P \leq 0,05$), выделение – 0,70 г, баланс +0,86 г – наибольший

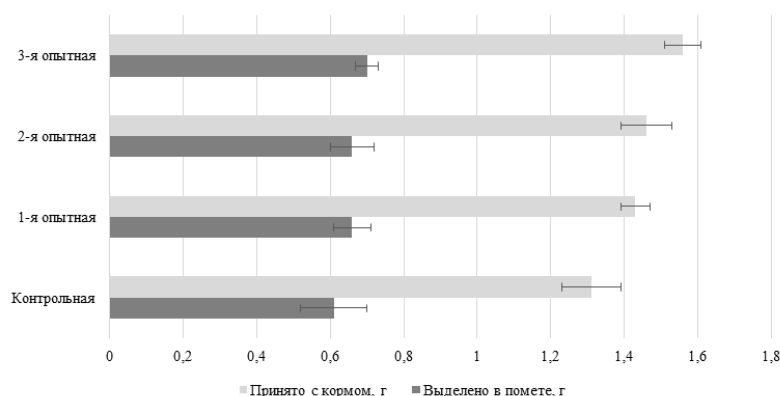


Рис. 3. Баланс и использование фосфора кормосмеси цыплятами-бройлерами в опыте за сутки, г ($M \pm m$, $n = 5$)

среди всех групп, но из-за разброса данных (ошибка 0,07 г) отличие от контроля незначимо, использование фосфора – 55,17 %, что на 1,52 п.п. выше контроля. Таким образом, введение фитодобавки повышает потребление фосфора (значимо при максимальной дозе) и абсолютный положительный баланс, отмечается тенденция к улучшению использования фосфора с 53,65 % в контроле до 55,17 % в 3-й опытной группе; хотя различия, кроме потребления, не достигли уровня значимости, направленность изменений согласуется с данными по азоту и кальцию.

Более высокий уровень отложения этих макроэлементов в организме растущих цыплят мясной породы по сравнению с контрольными аналогами может служить показателем активного прироста массы тела и развития костной ткани. Эти результаты подчеркивают важность содержания минералов в рационе бройлеров для поддержания их здоровья и продуктивности.

В начале эксперимента живая масса подопытных цыплят-бройлеров находилась примерно на одинаковом уровне (Рис. 4).

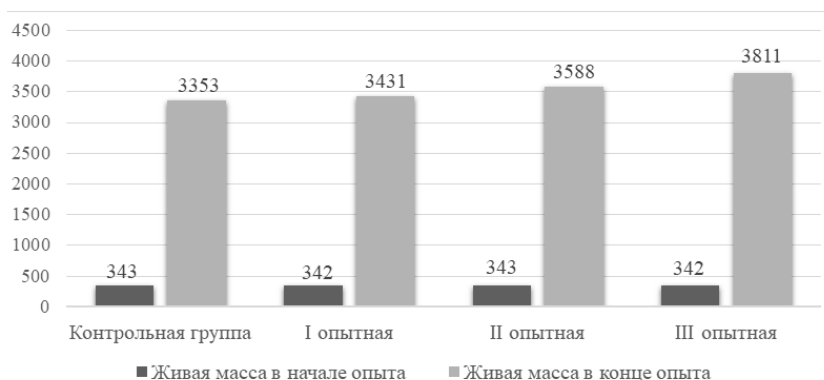


Рис. 4. Живая масса цыплят-бройлеров, г

Наибольший прирост массы (превышающей показатели контрольной группы на 458 г.) был зарегистрирован у цыплят 3-й опытной группы, которые получали комбикорм с максимальной дозировкой фитодобавки. Цыплята 2-й опытной группы, получавшие базовый рацион с повышенной дозировкой, также значительно опередили контроль, набрав на 235 г больше. Птица 1-й опытной группы, получавшая комбикорм с наименьшей дозировкой, показала меньший результат прироста живой массы по

сравнению с другими группами, однако также превосходила контрольную группу на 78 г.

Результаты эксперимента на цыплятах-бройлерах показали, что добавление фитодобавки из рапontiкума сафлоровидного в базовый корм способствовало увеличению абсолютного прироста живой массы тела цыплят в экспериментальных группах на 2,62 %, 7,94 % и 15,25 % в сравнении с контролем (Рис. 5).

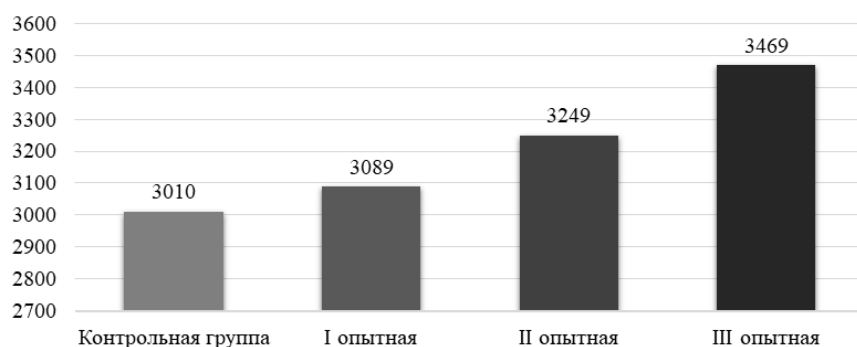


Рис. 5. Абсолютный прирост, г

Представленные в нашей работе данные показывают статистически достоверное увеличение живой массы тела у бройлеров, получавших фитодобавку, что может быть связано с наличием в левзее сафлоровидной таких биологически активных компонентов, как фитоэктистероиды, которые имеют анаболический эффект и способствуют ускоренному росту птицы опытных групп.

Наши результаты согласуются с данными исследований, полученными в разных странах. Так, анаболический эффект обусловлен способностью эктистероидов стимулировать процессы биосинтеза белка в мышцах у млекопитающих и птицы (Хашеми С. Р., Давуди Х., 2012; Arif Y., 2022; Шарма М., Каушик П., 2021; Bajguz A., Bańska I., Talarek M., 2015).

Исследования Ивановского А.А. (2022) и Тимофеева Н.П. (1999) подтверждают высокую расположенность к синтезу протеина при приёме эктистеронсодержащих составов, что не сопровождается опасными для жизни побочными эффектами у животных.

Данные нашего исследования также подтверждают эффективность применения фитодобавки на основе левзеи сафлоровидной в рационе молодняка мясных кур. Сравнение рационов с добавлением левзеи сафлоровидной в дозах 3-5 г способствовало более интенсивному росту и увеличению живой массы птицы.

Таким образом, для устойчивого развития птицеводческой отрасли в настоящем и будущем необходимо оптимальное и точное применение растительных средств, которые компенсируют недостатки традиционных комбикормов. Однако условия содержания и производственные мощности также стоит рассматривать как дополнительные факторы, которые будут только усиливать положительный эффект от фитодобавок, выбранных для рациона птицы.

Заключение

Итоги проведённого испытания можно апробировать для оценки потенциального воздействия фитодобавки на основе левзеи сафлоровидной на процессы жизнедеятельности бройлеров.

Нами проанализирована возможность использования левзеи сафлоровидной в качестве потенциальной кормовой фитодобавки, которая влияет на баланс усвоения азота, кальция и фосфора, а также на прирост массы тела цыплят-бройлеров.

Согласно нашим результатам, левзея сафлоровидная в качестве фитодобавки стимулировала процессы усвоения кальция и фосфора. Увеличение привеса у птиц на 2,62 %, 7,94 % и 15,25 % в эксперименте с фитодобавкой связано с достаточным количеством кальция и фосфора в порошке из левзеи сафлоровидной. Дефицит этих макроэлементов приводит к анорексии, остеопорозу и замедлению роста у птиц.

Очевидно, что мука из листьев левзеи сафлоровидной в качестве кормового сырья может быть включена в рацион цыплят-бройлеров в количестве до 4-5 г. на голову с целью компенсации недостатков традиционных промышленных кормов без какого-либо негативного влияния на организм.

Библиографический список

1. Майсак Г. П., Матолинец Д. А., Авдеев Н. В. Научные основы технологии возделывания левзеи сафлоровидной на семена в Предуралье: методические рекомендации. Пермь: ОТ и ДО. – 2023. – 48 с.
2. Ивановский А.А. Растения как источник фитобиотиков и фармпрепаратов для животных: Монография. Киров: ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. – 2022. – 136 с.
3. Тодорова В., Иванов К., Делатр С., Налбантова В., Карчева-Бахчевска Д., Иванова С. Растительные адаптогены: история и перспективы // *Nutrients* – 2021. 13(8):2861. DOI: 10.3390/nu13082861.
4. Хашеми С. Р., Давуди Х. Травянистые растения как новый иммуностимулятор в птицеводстве: обзор // *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*. - 2012. – Vol. 7. P. 105–116. DOI: 10.3923/ajava.2012.105.116
5. Морозков Н. А., Суханова Е. В., Кайгородов Р. В., Жданова И. Н., Терентьева Л. С. Эффективность использования фитодобавки из астрагала нуттового в рационах кур-несушек // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2024. – Т. 25. – № 4. – С. 664–673. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.664-673
6. Овсянников А.И. Основы опытного дела. М.: Колос, 1976. – 304 с.
7. Фисинин В.И., Имангулов Ш.А. Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы: рекомендации. Сергиев-Посад: ВНИТИП, 2004. 44 с.
8. Тимофеев Н.П. Новая технология и производственная эффективность высококачественного растительного сырья рапontiкума сафлоровидного // *Новые и нетрадиционные растения и перспективы их практического использования*. Пушкино: РАСХН, 1999. – Т. 3. – С. 465-467.
9. Arif Y. Phytoecdysteroids: Distribution, Structural Diversity, Biosynthesis, Activity, and Crosstalk with Phytohormones // *International Journal of Molecular Sciences*. - 2022. – Vol. 23. – № 15. – P. 16616596 DOI:10.3390/ijms23158664
10. Шарма М., Каушик П. Растительные фитохимические вещества: современные методы экстракции и анализа // *Биокатализ и сельскохозяйственная биотехнология* – Т. 36. – 2021. – с. 102–149
11. Bajguz A., Bąkała I., Talarek M. Ecdysteroids in Plants and their Pharmacological Effects in Vertebrates and Humans // *Studies in Natural Products Chemistry*. – 2015. – Vol. 23. – P. 121–145

Благодарности:

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122030400198-6 Поиск, изучение генетических источников и доноров хозяйственно-ценных признаков многолетних кормовых трав с разработкой научных основ технологий

возделывания и использования, экономически значимых для регионов Нечерноземья видов и сортов сельскохозяйственных культур, в том числе, обладающих биологической активностью).

Для цитирования:

Жданова И.Н., Лепихина Е.В., Морозков Н.А. Левзея сафлоровидная как источник кормовой фитодобавки для молодняка сельскохозяйственной птицы // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 118–126. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.8>

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, д. 12; e-mail: saratov_perm@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0260-6917

Лепихина Елена Валерьевна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов, «Пермский НИИСХ»; e-mail: elene831@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0419-1126

Морозков Николай Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов, «Пермский НИИСХ»; e-mail: ivanushkizabereznik@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3454-7843

RHAPONTICUM CARTHAMOIDES AS A SOURCE FEED PHYTODRUGS FOR YOUNG POULTRY

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

Perm Agricultural Research Institute, Perm

The study evaluated the effect of a phytosupplement based on *Raponticum carthamoides* at various doses on the productivity of broiler chickens, compared to a control group fed a traditional diet used at the enterprise. The aim of the experiment was to assess the effect of different doses of *Raponticum carthamoides* added to the main feed mixture on the balance of absorption of certain macronutrients in young poultry and on growth rates. The total number of birds in the experimental groups was 140, at the age of 14 days, with 35 birds in each group (n=35). The control group received the basic diet (BD), while the three experimental groups were fed as follows: the basic diet was supplemented with 1.60%, 2.10%, and 2.60% of the diet. The results of the study showed a positive nitrogen balance in the broiler chickens in the experimental groups. Feeding a phytosupplement based on *Raponticum carthamoides* improved the digestibility of feed protein, resulting in increased weight gain in young poultry. The addition of the tested phytosubstance to the compound feed did not have a negative effect on the mineral composition of the experimental birds. During the studies, the macronutrients that came from complex sources, including the phytosubstance based on *Raponticum carthamoides*, demonstrated better bioavailability, which was expressed in a more efficient use of nitrogen and calcium-phosphorus component of the feed. In broiler chickens that received *Raponticum carthamoides* in the basic diet, the absolute increase in live weight was 2.62-15.25% higher than in the control group. The effect on broiler productivity depended on the dosage, and the most effective result was achieved by adding *Raponticum carthamoides* at the maximum dose (5 g of powder per feed mixture).

Keywords: *poultry young birds, biologically active substances (BAS), feed phytosubstance, raponticum carthamoides, phytoecdysteroids, safety, growth, and productivity*

Поступила в редакцию: 30.03.2026

Принята к публикации: 17.06.2026

ЛЕКСЕМЫ КОЛОДЕЦ, ЮКМӖС И ӖШМӖС «КОЛОДЕЦ» В КОМИ-ПЕРМЯЦКОМ ЯЗЫКЕ: СЕМАНТИКА И ЭТИМОЛОГИЯ

Лобанова А.С., Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
Институт гуманитарных исследований УрО РАН, г. Пермь

Кривошеков А.Д., Институт гуманитарных исследований УрО РАН, г. Пермь

Статья посвящена семантическому и этимологическому анализу трёх лексических единиц *колодец*, *юкмӖс* и *ӖшмӖс*, активно функционирующих в коми-пермяцком языке. Согласно различным лексикографическим источникам (XVIII, XIX, XX веков), они способны реализовать значение «колодец», за двумя последними лексемами также закреплены значения «прорубь» и «ключ». Современные диалектные материалы и тексты коми-пермяцких писателей не всегда подтверждают данные, зафиксированные в словарях. Сомнения не вызывает заимствованное из русского языка слово *колодец*: оно употребляется в исходном значении, что подтверждает гипотезу о том, что колодцы у коми-пермяков появились довольно поздно. Полагаем, что по этой причине в коми-пермяцкой культуре нет богатой сакральной символики, связанной с этим объектом. Исконные лексемы общепермского происхождения *юкмӖс* и *ӖшмӖс*, имеющие соответствия в коми-зырянском и удмуртском языках, первоначально обозначали «прорубь», «источник». Со временем эти лексемы в коми языках подверглись деэтимологизации: в разных диалектах обоих коми языков они стали обозначать «колодец», сохранив при этом первоначальную семантическую нагрузку «прорубь» («родник»). *ЮкмӖс* и *ӖшмӖс* в речи коми-пермяков имеют четкую территориальную привязку. Слово *ӖшмӖс* встречается на территории северных диалектов коми-пермяцкого языка и функционирует в двух значениях – «прорубь» и «колодец». Слово *юкмӖс* известно коми-пермякам, проживающим на более южных территориях, оно сохранило первоначальное значение «прорубь», а для передачи значения «колодец» используется заимствованная русская лексема. Не повсеместный семантический сдвиг в семантике слов *ӖшмӖс* и *юкмӖс* в пользу значения «колодец» в речи коми-пермяков требует дополнительных наблюдений, связанных с наименованиями водных объектов.

Ключевые слова: коми-пермяцкий язык, семантика, этимология, колодец, *ӖшмӖс*, *юкмӖс*, диалекты, заимствование, водный объект, лексикографический источник, родственные языки

Введение

Колодец – один из древних способов добычи чистой питьевой воды. Для многих народов данный хозяйственный объект имеет ряд положительных ассоциаций: у славян – это источник воды, символ жизни и плодородия [1]; у кельтов – врата, через которые из иного мира в наш мир приходит божественное и магическое [2]; у индусов – центр общественной жизни [3] и др.

В русской лингвокультуре и фольклорных текстах колодец также является местом перерождения, перехода в иные измерения и т.д. Во многих сказках, в том числе и русских народных, колодец является значимым элементом сюжетной линии («Синюшкин колодец» – П. Бажов, «Девушка в колодце» – русская народная сказка и др.). Широко колодец представлен в русских пословицах и поговорках (не плюй

в колодец – пригодится воды напиться; не ценим воду до тех пор, пока не высохнет колодец и др.). Колодец также является отгадкой в некоторых русских загадках (Где вода стоит столбом? Я опять хочу напиться! Очень вкусная водица! А откуда достается? – Из глубокого ... и др.). Одним словом, у различных этносов колодец – это сакральный объект, символ очищения и источник жизни, вот почему символика, мотивация, ассоциативность слов, связанных с колодцем, довольно высоки. В то же время язык и культура коми-пермяков практически не подтверждают обозначенные выше позиции, связанные с этим водным объектом.

Методы исследования

При анализе материала был использован метод *функционально-семантического анализа*, который необходим для определения конкретных лексических значений анализируемых лексем в контексте (в том числе диалектных и художественных текстах), а также поиска мотивов вторичной номинации водных объектов. *Этимологический* и *сравнительно-исторический* методы применялись для определения происхождения и истории функционирования исконных лексем *õšmõs* и *jõkmõs* в пермских языках.

Обсуждение результатов

Колодец как один из необходимых в повседневной жизни объектов хозяйства сельского жителя коми-пермяка, имеющийся сегодня почти в каждом населенном пункте, редко становился предметом внимания исследователей. Имеются лишь отдельные сведения, связанные с некоторыми поверьями и гаданиями, бытующими среди коми-пермяков (О.И. Уляшев, Г.Н. Чагин, Т.Г. Миннихметова, Т.Г. Голева). «Начертив круг вокруг себя у колодца, гадающая накрывается шубой и прислушивается к шуму из колодца, т.к. колодец связан с потусторонним миром (зап. в д. Серва Кочёвского района КПАО)» [4, 178]. В этой же статье отмечено: «У коми-пермяков девушки гадают в Петров день: загадывают суженого и смотрят «отражение» звезд на поверхности колодца (с. Верх. Юсево Кудымкарского района КПАО)» [4, 179]. (Полагаем, что при паспортизации материалов допущена ошибка: следовало написать с. Верх-Юсьва, вместо с. Верх. Юсево). Подобные сведения приводятся и в материалах народа коми (-зырян), например: «человек, плюнувший в ручей, реку, колодец будет печалиться» [5, 95].

Незначительные сведения в различных научных и научно-популярных источниках о строительстве коми-пермяками колодцев, отсутствие исконных терминов для обозначения деталей сооружения говорят в пользу того, что в прошлом этот объект не был обязательной частью подворья. Об этом же говорят и археологические данные, не содержащие информации о наличии колодцев в хозяйственном комплексе древних коми-пермяков. Вот как описывал результаты раскопок известный археолог В.А. Оборин: «Около некоторых жилищ прослежены остатки изгороди, которая огораживала двор. В глубине участка находилась еще одна яма – кладовка ... жилые дома, легкие постройки с плетневыми стенками, которые могли служить загоном для скота, очаги для плавки металла ... постройка с очагом в центре по устройству очень напоминает баню (пывсян)» [6, 9].

Судя по всему, древние пермяне селились около рек, речушек и родников, благо природные особенности их проживания позволяли строить жилища вблизи естественных водных источников. «Вода в жизни удмуртов, как и многих других

народов, имела огромное значение. Она издавна считалась первоисточником жизни. Поэтому люди поселялись, прежде всего, у рек, ручейков, родников» [7, 11]. Хотя иногда поселение могло возникнуть на определенном расстоянии от родника. Тогда жители вынуждены были привозить воду в больших емкостях и сразу на несколько дней. *Сэччинка ва эз вёл. Васё ваялісё ключись, за километры, за километры* «Там воды не было. Воду таскали (привозили) из родника, за километр, за километр» (Пятина Кудым.) [8]. Вот как отмечают наличие колодца в деревне сегодня: *Ме кёр вокті татчё овны, дак токо ётік вёвви колодецыс, а сэсся чисто шорвись кайётвисё васё* «Когда я переехала сюда жить, так только один колодец был, а все с речки воду таскали» (Мосино Юсёв.) [9]. Лишь в недавнем прошлом с целью облегчения своего труда жители начали активно сооружать данные объекты. Но и сегодня многие отдают предпочтение ключевой воде.

Довольно поздним появлением колодцев в жизни коми-пермяков объясняется то, что колодец ни в языке, ни в традиционной культуре не воспринимается как чудотворный объект, наделенный особой божественной или сверхъестественной силой. Колодец практически не встречается в национальных сказках, его нет в составе пословиц и поговорок (за исключением калек с русского языка). При этом надо сказать, что этот объект воспринимается положительно и имеет общую одобрительную оценку. Полагаем, что немногочисленные гадания и обряды, осуществляемые возле колодца, могли появиться в силу внешних факторов, например, могли быть заимствованы из русской традиционной культуры; либо они могли возникать под влиянием вторичных факторов, когда свои же обряды, проводимые ранее возле естественных родников, «переносились» к колодцу, тоже водному объекту.

Возможно, языковые данные позволят показать, на каком этапе и в силу каких причин возникли наименования, обозначающие источники воды, а значит, и жизни, в коми-пермяцком языке. Наименования колодца или естественного родника, с точки зрения их возникновения и смысловой нагрузки, еще не становились объектом отдельной научной работы, что составляет актуальность данного исследования.

В данной статье сделана попытка показать семантику и этимологию лексем, реализующих значение «колодец» в коми-пермяцком языке. Опережая результаты анализа, отметим, что языковой материал будет вынуждать обращаться и к другим наименованиям водных источников.

Согласно данным «Коми-пермяцко-русского словаря», в коми-пермяцком языке встречается несколько наименований, значение которых связано с изучаемым объектом: *колодец*, *юкмёс*, *ёшмёс* (*ёшымёс*): «**колодец** – колодец, *иньв.* ководеч, коодеч» [10, 181]; «**ёшмёс** – 1) колодец 2) редко прорубь 3) уст. ключ, источник» [10, 309]; «**юкмёс** – 1) колодец || колодезный 2) прорубь» [10, 589]. Два наименования – *ёшмёс* и *юкмёс* – могут реализовать несколько значений: «колодец», «прорубь», «ключ». Только заимствованная лексема *колодец* со всеми фонетическими вариантами имеет одно значение.

Современный языковой материал демонстрирует более четкую дифференциацию этих наименований и не всегда подтверждает распределение семантической нагрузки приведенных слов в словарях. Особенно ярко она проявляется в диалектной речи и на страницах коми-пермяцких художественных текстов. При этом следует помнить, что диалектная принадлежность автора также довольно сильно влияет на употребление значения той или иной лексемы в тексте. Писатели «южных»

территорий (современные Кудымкарский и Юсьвинский МО) лексемой *юкмӧс* обозначают прорубь, а заимствованным словом колодец, соответственно, называют уже другой водный объект. В их текстах практически не встречается слово *ӧшмӧс* (или *ӧшымӧс*).

У представителей северных диалектов (территории Кочевского, Косинского и Гайнского МО) картина распределения изучаемых слов совсем иная: на страницах их текстов нет слова *юкмӧс*, очень редко встречается слово *колодец*, зато *ӧшымӧс* реализует сразу два значения: «колодец» и «прорубь». И только контекст помогает раскрыть нужное значение слова.

Остановимся на некоторых примерах из произведений В. Климова и В. Баталова, национальных писателей, представляющих южные территории Коми-Пермяцкого округа. *Сія кадсянь, шуӧны, и кутчӧмась колодецесӧ гарйыны* «С этого времени, говорят, и начали копать колодцы» [11, 151]. *Быд лун двадцать гозӧн колодецись лӧбтам да вытаным новьям* «Каждый день по двадцать пар (непонятно, может быть, пар ведер? <воды>) из колодца поднимем и на себе носим» [12, 38]. *Глаша гумышитіс юкмӧсись ва, сувтӧтис ведрасӧ йы вылӧ* «Глаша зачерпнула из проруби воду, поставила ведро на лёд» [13, 330]. *Осьтышиті синнӧзӧс и адзза: не гуна пытикын пукала, а вадӧрын, самӧй юкмӧс дынас* «Приоткрыл глаза и вижу: не внутри гумна сажу, а у воды, у самой проруби» [14, 166]. Примеры демонстрируют, что исконное слово *юкмӧс* у авторов имеет значение «прорубь», но никак не «колодец»; за этот объект в их текстах отвечает заимствованная лексема.

Нельзя оставить без внимания отрывок из легенды о появлении реки Камы, обработанной В. Климовым: *Но вот эта увтыр ордӧ локтӧм беда: косьмӧмась ключез, ӧшмӧссӧз, нем лоӧма юны.*

Этӧ бедасӧ увтырыс ордіс ылӧтас Кам. Сія бадь уввезіс гӧрдззас юркытш, бадь уввезӧн жӧ йиасяс. И жагвыв йӧктӧмӧн пондас кытилавны горт мусӧ. И вот ӧтілаын улоккес нюжӧтчасӧ муыслань, дзик ловьяӧсь.

– Эстӧн! – висьталас Кам.

Сія мый вын топнитас кокнас, и му пытиксис пондас котӧртны ключ.

Но вот к этому народу пришла беда: высохли ключи, колодцы, нечего стало пить.

Эту беду от народа отведет Кам. Он из ивовых веток сплетёт венок, ивовыми ветками же опояшется. И, медленно танцуя, станет обходить родную землю. И вот в одном месте ветки потянутся к земле, как будто живые.

– Тут! – скажет Кам.

Он что есть мочи топнет ногой, и из-под земли будет течь ключ» [11, 173].

Примечательно, что в этом контексте показана методика поиска воды: ветки растений потянулись к земле. В данном контексте нас в большей степени интересует фраза: *Но вот эта увтыр ордӧ локтӧм беда: косьмӧмась **ключез**, ӧшмӧссӧз, нем лоӧма юны* «Но вот к этому народу пришла беда: высохли **родники, колодцы**, нечего стало пить». Полагаем, что слово *ӧшмӧссӧз* писатель использовал в значении «колодцы». Возможно, автор решил отказаться от заимствованного слова *колодец* и использовал лексему *ӧшмӧс*, зная, что она активно функционирует в диалектах северного наречия коми-пермяцкого языка.

Обратимся к текстам Т. Фадеева и С. Федосеева. Эти писатели представляли так называемые «северные» территории. Например: *Гожумнас ваыс быд ӧшымӧсын эм* «Летом вода в каждом колодце есть» [15, 182]. *Андрейыс котӧртис поныс керку ӧшын*

увтö, кытöн öшымöс весьтын пыр öшалö ведра «Андрей побежал к окну дома попа, где над колодцем всегда висит ведро» [16, 97]. *И вöвлі кö зонка не öддьöн мыдз, уджыс адззисьліс эшö и керку гөгөр, кайöтышитны, шуам, мамыслö отсалöм могись öшымöс дорись гоз ведра мымда ва* «И если мальчик не был очень уставшим, работа находилась и вокруг дома, принести, скажем, матери, от желания помочь, из проруби пару вёдер воды» [17, 248].

Использование изучаемых лексем – *колодец*, *юкмöс*, *öшымöс* – в художественных текстах доказывает, что в коми-пермяцком языке существует явная территориальная ограниченность в употреблении этих слов. Напомним, что язык коми-пермяцких писателей не всегда подвергался строгому редактированию, авторы часто использовали диалектную лексику (а иногда и диалектные грамматические особенности) в своих произведениях. Вот почему так важны художественные тексты при анализе тех или иных особенностей языка коми-пермяков. Выходит, что местные слова проникали в обработанный литературный язык и таким образом способствовали развитию словарного состава литературного языка.

Диалектная речь подтверждает семантическую нагрузку слов *колодец*, *юкмöс* и *öшмöс*, реализующихся в художественных текстах. Приведем пример из записей нердвинского диалекта коми-пермяцкого языка, представляющих южное наречие: *Ва дорын – этö юкмöс. На речке юкмöсыс, на речке. А этö, эта называется колодец* «У реки – это прорубь. На речке прорубь, на речке. А этот, этот называется колодец» (Балкачи Кудым.) [18]. Возьмём пример из записей кочевского диалекта, представляющего северное наречие: *Видзöтам – öшмöс дорын лоим, чуть только ваас эг пырö* «Смотрим – у проруби оказались, чуть только в воду не зашли» (Митино Коч.) [24].

Приведенные выше данные позволяют нам усомниться в правильности трактовки значения изучаемых слов в «Коми-пермяцко-русском словаре», в первую очередь, слова *юкмöс*: ни диалектные данные, ни художественные тексты на современном этапе не демонстрируют семантику «колодец». Это слово сегодня известно с одним значением – «прорубь».

Попытаемся более подробно рассмотреть данные лексемы в функциональном аспекте и выявить их этимологию.

По поводу заимствованного слова *колодец* можно сказать, что сегодня оно является общеупотребительной и доминирующей номинацией водного объекта в речи коми-пермяков. Определить время его заимствования довольно сложно. Ответы, возможно, могли бы дать сохранившиеся письменные памятники. Обратимся к двум из них. В лексикографическом источнике «Кратко-пермской словарь с російскимъ переводомъ собранный и по Алфавиту расположенный города Перми Петро-Павловского Собора Протоіереємъ Антоніємъ Поповымъ», составленном в 1785 году, слова нет, зато зафиксировано название *эшмесь – колодезь* [19, 53]. В этом же рукописном источнике приводится слово *юкмесь* в значении «водопойня» [19, 54]. Напомним, что этот словарь является наиболее ранней работой, в которой представлено название данного хозяйственного объекта. Принято считать, что А. Попов описывал один из исчезнувших к сегодняшнему дню диалектов: «В рукописях Антония Попова отражен один из вымерших эловых диалектов пермяцкого языка, некогда бытовавших на территории бывшей Перми Великой (условно между Чердынью и Усольем)» [20]. Судя по всему, семантические позиции слов *öшмöс* и *юкмöс* (современное написание слов – А.Л., А.К.), зафиксированных в словаре А. Попова, так или иначе сохранились и

в современных диалектах: словом *õшмõс* (чаще *õшымõс*) северные коми-пермяки действительно обозначают два объекта – колодец и прорубь; а лексема *юкмõс* в речи южных коми-пермяков является обозначением понятия «прорубь».

В лексикографической работе Н.А. Рогова «Пермяцко-русский и русско-пермяцкий словарь», считающейся самым полным и объемным источником XIX века, для обозначения колодца приводятся два наименования – заимствованное и исконное: «**ководеч**ј, с. колодецъ» [21, 71] и «**õшыммõс**, с. колодецъ» [21, 118]. За словом *юкмõс* автор словаря закрепил уже привычное значение – прорубь: «**Јукмõс**, с. прорубь» [21, 63]. Н.А. Рогов описывал словарный состав говоров современных Кудымкарского и Юсьвинского муниципальных округов, т.е. южных территорий Коми-Пермяцкого округа.

Таким образом, два ранних лексикографических источника коми-пермяцкого языка подтверждают тот факт, что и в прошлом было довольно четкое разделение слов, обозначающих водные объекты *колодец* и *прорубь*. Сооружения, которые принято называть колодцами, именовали двояко: либо заимствованной лексемой (*колодец*, *ководеч*, *коодеч*), либо исконным словом *õшмõс* (совр. *õшымõс*, по Н. Рогову – *õшыммõс*). Лексема *юкмõс* обозначала отверстие, прорубленное во льду замерзшего водоема, т.е. прорубь. Получается, что данное семантическое распределение существует и сегодня, только *õшмõс* (*õшымõс*) практически забыто на территории его активного функционирования в XVIII-м и XIX-м столетиях, зато в диалектах северного наречия этой лексемой называют и колодец, и прорубь.

Если колодец как водное сооружение пермяки заимствовали у русских, то слово *колодец* (и его фонетические варианты) могло оказаться в речи коми-пермяков и до XVIII столетия. Возможно, более тщательный анализ археологических данных сможет помочь подтвердить время появления колодца на территории Прикамья.

Для решения вопроса о времени возникновения лексем *юкмõс* и *õшмõс* («колодец», «прорубь»), следует обратиться к близкородственным языкам – к коми-зырянскому и удмуртскому.

В диалектах коми-зырянского языка наблюдается примерно такая же картина, как и в коми-пермяцком языке. Так, для обозначения семантики «*колодец*» в лузско-летском диалекте используются слова *колодеч* и *õшмõс* [22: 701, 47]. *Õшмõс* в значении «колодец» также употребляется в верхнесысольском и среднесысольском диалектах [22, 47]. В одном диалекте – лузско-летском – словом *õшмõс* обозначают «прорубь» [23, 47]. Со словом *юкмõс* тоже не все однозначно: в присыктывкарском и нижневычегодском диалектах этим словом называют колодец, а в остальных диалектах коми языка за ним закреплено значение «прорубь» [23, 863].

В «Удмуртско-русском словаре» для обозначения колодца приводятся следующие наименования: *гудзем*, *голбеч*, *жõгы*, *колодча*, *корсо*, *кõйы*, *куйы*, *кыйгу* [24: 170, 163, 243, 312, 321, 328, 348, 368]. Отметим, что не все отмеченные лексемы считаются литературными. В словаре большая часть из них обозначена как лексический диалектизм. Лексеме *куйы* считают заимствованной из тюркских языков [4, 158], а слово *гудзем* образовано от глагола *гуджыны/гудзыны* – «покопать, копать немного; вскопать недолго; порыть, рыть немного» [4, 158]. По сравнению с коми языками, в удмуртском языке всеми лексемами закрепляется только одно значение – «колодец». Лишь слово *корсо* знает два значения: «колодец» и «ключ» [24, 321]. Это объясняется и заимствованиями из разных языков, и возможными появлениями исконных вариантов.

В удмуртском языке функционируют слова *люкмес* в значении «прорубь, полынья» и *ошмес* «ключ, родник» [24: 415, 501]. Общность этих лексем со словами коми языков очевидна. Данную точку зрения подтверждают и авторы КЭСЯ, указывая допермский период их возникновения. Вот что говорится в этимологическом словаре по поводу этих лексем: «*õшмõс* диал. ‘колодец, прорубь’; *õшымõс* кс. ‘тж’ (диал. хр.); кя. (в топонимике) *õšmәs*; *õшмõс* вым. (приток р. Вымь) | удм. *ошмес* ключ, родник. – общеп. **õšmәs* ‘источник, ключ’, ‘приток (реки и т. д.)’» [25, 213]; «*юкмõс* ‘колодец’, ‘прорубь’ | удм. *люкмес* ‘прорубь’, ‘полынья’ – общеп. **juk-mәs*; первоначально являлось сложным словом, первый компонент которого одного происхождения со словом *ю* ‘река’ или *юктавы* ‘поить’, *юны* ‘пить’ (ист. вок., 214); вторая часть, возможно, означала источник, ср. *õш-мõс* ‘колодец’, *чермõс* (в топонимике) ‘истоки речки’» [25, 334].

Надо полагать, что после распада общепермской общности в коми языках произошла деэтимологизация слов, особенно это касалось лексемы *õшмõс*: у неё появилась новая семантическая нагрузка – *колодец*. Это изменение коснулось не всех диалектов коми языков. На отдельных территориях, например, в южном наречии коми-пермяцкого языка, данная лексема практически ушла из употребления, зато в диалектах северного наречия коми-пермяцкого языка *õшмõс* и сегодня употребляется в двух значениях: «колодец» и «прорубь». Только контекст помогает определить значение слова. Слово *юкмõс* (удм. *люкмес*) оказалось более устойчивым, сохранив за собой значение «прорубь», оно в меньшей степени поддается семантическим изменениям. При этом *юкмõс* «прорубь» тоже не является общеизвестным.

Õшмõс и *юкмõс* (удм. *люкмес*), являясь сложными по своему составу, имеют общий второй компонент *мõс*, *мес*, который связан с значением «источник, исток» [25, 213]. Относительно первых компонентов следует отметить, что и они указывают на водный источник (см. там же). В.И. Лыткин и Е.С. Гуляев считают, что «компоненты являлись синонимами (‘приток’ – ‘источник’)» [25, 213].

В силу разных причин: внешних сходств водных объектов (колодца и проруби), их предназначения и функциональных особенностей, – появилась возможность возникновения вторичного значения у исконных слов *õшмõс* и *юкмõс* в коми языках. Удмуртский язык сохранил их первоначальное значение, а для понятия *колодец* использовал иные источники – это собственные словообразовательные ресурсы или заимствования.

Таким образом, данные пермских языков, связанные с обозначением колодца как хозяйственного водного объекта, дают основание считать, что колодцы возникли довольно поздно: в пермских языках нет единой лексемы, отвечающей за данное значение. Зато во всех пермских языках сохранились две древние лексические единицы *õшмõс* (удм. *ошмес*) и *юкмõс* (удм. *люкмес*) в значении «прорубь, родник, ключ», восходящие к допермскому периоду. Эти лексемы стали в дальнейшем источником нового значения «колодец» в коми языках. В коми-пермяцком и коми (-зырянском) языках наблюдаются схожие процессы: для обозначения колодца используется либо заимствованное из русского языка слово *колодец*, либо происходит изменение значения лексем *õшмõс* и *юкмõс*. При этом в диалектах обоих коми языков фиксируются и свои лексемы для обозначения природных водных объектов.

Библиографический список

1. Голубева Е.В. Колодцы как сакральный пространственный локус // Молодой ученый. – 2009. – № 10 (10). – С. 222–225. URL: <https://moluch.ru/archive/10/702> (дата обращения 16.02.2026).
2. Мялова О.В. Священные колодцы Ирландии. – Текст: электронный // Perspektum. info. – 2024.: [сайт]. – URL: <https://perspektum.info/svyashhennye-kolodtsy-irlandii/> (дата обращения: 16.02.2026).
3. Лукьянова Д.А. Как борются с нехваткой воды в Индии: ступенчатый колодец Чанд-Баори. – Текст: электронный // travelask.ru. – 2022.: [сайт]. – URL: <https://travelask.ru/blog/posts/32715-kak-boryutsya-s-nehvatkoj-vody-v-indii-stupenchatyy-kolodets> (дата обращения: 16.02.2026).
4. Миннихметова Т.Г. Традиционные обряды закамских удмуртов: Структура. Семантика. Фольклор. – Tartu, 2003. – 235 с.
5. Мифология коми / Рос. акад. наук. Урал. отд-ние. Коми науч. центр, Ин-т яз., лит. и истории, М-во образования и высш. шк. Респ. Коми; А.Н. Власов и др.; науч. ред. В.В. Напольских. – Москва, Сыктывкар: ДИК, Ин-т яз., лит. и истории, 1999. – 479 с.
6. Оборин В.А. Этнические особенности средневековых памятников Верхнего Прикамья // Вопросы археологии Урала. Вып. 9. – Свердловск, 1969. – С. 3–27.
7. Кириллова Л.Е. Географические термины в удмуртской топонимии: монография / УдмФИЦ УрО РАН. – Ижевск, 2020. – 228 с.
8. АПМЛ – Архив полевых материалов А.С. Лобановой.
9. АПМ ИГИ УрО РАН – Архив полевых материалов Института гуманитарных исследований УрО РАН
10. КПРС – Коми-пермяцко-русский словарь / авт.-сост. Р.М. Баталова, А.С. Кривошекова-Гантман. – М.: Русский язык, 1985. – 624 с.
11. Климов В.В. Зарния чикиссез = Золотые косы: коми-пермяцкие сказки, легенды и предания. – Кудымкар, Коми-Перм. кн. изд-во, 1993. – 184 с.
12. Баталов В.Я. Съёкыт пондӧтчӧм: рассказы и очерки. – Кудымкар, Коми-Перм. кн. изд-во, 1959. – 112 с.
13. Баталов В.Я. Избранное. – Кудымкар: ГКБУК «Коми-Пермяцкий этнокультурный центр», 2016. – 400 с.
14. Климов В.В. Избранное. – Кудымкар: ПРОО «Общество радетелей коми-пермяцкого языка и культуры «Югӧр», 2017. – 408 с.
15. Федосеев С.А. Повны – не овны = Бояться – не жить: повести. – Кудымкар: Перм. кн. изд-во, 1989. – 301 с.
16. Федосеев С.А. Съӧд цветтӧз = Чёрные цвета: роман на коми-пермяцком языке. – Кудымкар, Коми-Перм. кн. изд-во, 1994. – 328 с.
17. Фадеев Т.П. Олӧм лун = Прожитый день: повести и рассказы на коми-перм. яз. – Кудымкар, 1991. – 350 с.
18. АПМ КПРО – Архив полевых материалов коми-пермяцко-русского отделения ПГГПУ.
19. Попов А. (сост.) Краткой пермской словарь с російскимъ переводомъ собранный и по Алфавиту расположенный города Перми Петро-Павловского Собора Протоіереємъ Антоніємъ Поповымъ 1785 года // Российская национальная библиотека. Отдел рукописей. Эрмитажное собр. № 206. – 81 л.
20. Лобанова А.С., Гайдамашко Р.В. Показатели словоизменительных грамматических значений в коми-пермяцком языке конца XVIII века (на материале рукописных словарей протоиерея Антония Попова // Томский журнал лингвистических и антропологических исследований. – 2021. Вып. 1(31). – С. 34 – 46. (дата обращения: 18.02.2026).
21. Rogov H.A. Пермьцко-русский и русско-пермьцкый словарь. – СПб., 1869. – 427 с.
22. КСК – Коми сёрнисикас кывчукӧр = Словарь коми диалектов: в 2-х т. – Т. I: А–О. / авт.-сост. Л.М. Безносикова, Н.К. Забоева, Е.А. Айбабина, Р.И. Коснырева; под ред. Л.М. Безносиковой. – Сыктывкар: изд-во «Колá», 2012. – 1096 с.

23. КСК – Коми сёрнисикас кывчукӧр = Словарь коми диалектов: в 2-х т. – Т. II: Ӗ–Я. / авт.-сост. Л.М. Безносилова, Н.К. Забоева, Е.А. Айбабина, Р.И. Коснырева; под ред. Л.М. Безносиловой. – Сыктывкар: изд-во «Колá», 2014. – 888 с.
24. УРС – Удмуртско-русский словарь=Удмурт-ӹуч кыллюкам: Ок. 50 000 слов / РАН. УрО. Удм. ин-т ИЯЛ; Сост. Т.Р. Душенкова, А.В. Егоров, Л.М. Ившин, Л.Л. Карпова, Л.Е. Кириллова, О.В. Титова, А.А. Шибанов; Отв. ред. Л.Е. Кириллова. Ижевск, 2008. – 925 с.
25. КЭСКЯ – Краткий этимологический словарь коми языка / авт.-сост. В.И. Гуляев, Е.С. Лыткин. – Москва: Наука, 1970. – 386 с.

Благодарности:

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 24-18-20015 «Коми-пермяки в языковом и этнокультурном пространстве Прикамья»).

Для цитирования:

Лобанова А.С., Кривошеков А.Д. Лексемы колодец, юкмӧс и ӧшмӧс «колодец» в коми-пермяцком языке: семантика и этимология // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 127–136. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.9>

Сведения об авторах:

Лобанова Алевтина Степановна, кандидат филологических наук, доцент кафедры общего языкознания, русского и коми-пермяцкого языков и методики преподавания языков, заместитель декана по коми-пермяцко-русскому отделению, Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, («ПГГПУ»), 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24, старший научный сотрудник, Институт гуманитарных исследований УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИГИ УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4; e-mail: lobanova@pspu.ru, ORCID: 0009-0002-1488-4727

Кривошеков Анатолий Дмитриевич, стажер-исследователь, «ИГИ УрО РАН»; email: akrivoschekov985@gmail.com, ORCID: 0009-0002-8518-4365

THE LEXEMES KOLODETS, YUKMÖS AND ÖSHMÖS IN THE KOMI-PERMYAK LANGUAGE: ETYMOLOGY AND SEMANTICS

Lobanova A.S.^{1,2}, Krivoschekov A.D.²

¹Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm

²Institute of Humanitarian Studies UB RAS, Perm

The article is devoted to the semantic and etymological analysis of three lexical units kolodets, yukmös and öshmös which are actively functioning in the Komi-Permyak language. According to various lexicographic sources (of the XVIII, XIX, XX centuries) they can convey the meaning of «well», while the last two lexemes also carry the meanings of «ice hole» and «spring». However, contemporary dialectal data and literary texts of Komi-Permyak writers do not always confirm the data recorded in dictionaries. The word «well», borrowed from the Russian language, is beyond doubt: it is used in its original meaning, which confirms the hypothesis that wells appeared among the Komi-Permyak rather late. We believe that for this reason, there is no rich sacred symbolism associated with this object in the Komi-Permyak culture. The original lexemes of common Permian origin- yukmös and öshmös - which have alignments in the Komi-Zyryan and Udmurt languages, initially denoted «ice hole» and «spring». Over time, these lexemes underwent de-etymologization within the Komi languages: in various dialects of both Komi languages, they came to denote «well», while retaining the original semantic sense of «ice hole» or «spring». The words yukmös and öshmös in the speech of Komi-Permyaks have a distinct territorial distribution. The word ösmös is found within the area of the

northern dialects of the Komi-Permyak language and functions in two meanings «ice hole» and «well». The word yukmös is known to Komi-Permians living in more southern territories, it has retained the original meaning of «ice hole», whereas a borrowed Russian term is used to convey the meaning of «well». The fact that the semantic shift towards the meaning of «well» for the words öshmös and yukmös is not universal in Komi-Permian speech calls for further observation related to the terminology of water bodies.

Keywords: *Komi-Permyak language, semantics, etymology, well, öshmös, yukmös, dialects, borrowings, water bodies, lexicographic sources, related languages*

Поступила в редакцию 10.04.2026

Принята к публикации: 27.05.2026

ПЕРМСКОЕ ЭТНОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО В 1920-30-Е ГГ.

Кочеров А.А., *Институт гуманитарных исследований УрО РАН, г. Пермь*

В статье рассматривается история создания и деятельности Пермского этнографического общества (ПЭО) на фоне ключевых процессов в советской науке и политике 1920-1930-х годов. Показаны истоки организации, восходящие к дореволюционному «Кружку по изучению Северного края» (КИСК), и её институционализация в 1929 г. Раскрывается роль П.С. Богословского, выступившего инициатором преобразования кружка. В статье доказывается, что возникновение ПЭО стало частью общероссийского тренда на институционализацию этнологии, кульминацией которого стало открытие этнологического факультета в МГУ (1925). На основе архивных материалов и опубликованных источников реконструируется структура ПЭО, его комиссий, издательская и экспедиционная деятельность, идеологическая адаптация.

Ключевые слова: *Пермское этнографическое общество, Кружок по изучению Северного края, П.С. Богословский, А.Н. Грен, краеведение, этнография, фольклор, Пермский университет, Урал*

Введение

1920-е годы вошли в историю отечественной науки как «золотое десятилетие» краеведения – период бурного роста местных научных обществ, музеев и исследовательских инициатив [1]. Однако этот термин требует известной осторожности. При всей активизации краеведческого движения, уже во второй половине 1920-х годов нарастало давление власти: от краеведов требовали сдавать находки для продажи за границу, а к концу десятилетия начались систематические преследования учёных-гуманитариев, что ознаменовало переход от относительной свободы к жёсткому идеологическому контролю [2]. Таким образом, «золотое десятилетие» было временем относительной, но не абсолютной свободы, и конец 1920-х годов стал периодом, когда краеведческая работа оказалась под ударом.

После окончания Гражданской войны советская власть, взявшая курс на восстановление и индустриализацию страны, была жизненно заинтересована в практическом изучении её природных и людских ресурсов. Поддержка местных научных инициатив стала важной составляющей новой культурной политики, но при одном условии – они должны были служить интересам государства. Выступая на I Всероссийской конференции научных обществ в 1927 г., нарком просвещения А.В. Луначарский сформулировал эту задачу предельно откровенно: «Научные общества должны стать нашими боевыми помощниками в деле социалистического строительства» [1].

Центральным органом координации этого движения стало Центральное бюро краеведения (ЦБК), созданное при Академии наук СССР в январе 1922 г. С 1925 г. оно перешло в ведение Наркомпроса. Возглавил его выдающийся востоковед академик, С.Ф. Ольденбург, что свидетельствовало о высоком статусе, придаваемом этой деятельности [3]. Количество краеведческих организаций росло стремительно: если

к 1927 г. их насчитывалось 1112, то к концу десятилетия – около 2000 [1]. Именно в этот период, на волне общегосударственного интереса к изучению регионов и на основе дореволюционных традиций краеведения было создано в Перми Этнографическое общество.

В контексте данной статьи необходимо разграничить понятия этнологии и краеведения. Этнология (этнография) – это теоретическая наука, изучающая общие закономерности и различия в жизни разных этносов, их происхождение, расселение, культурные особенности и логику развития. Краеведение – это область гуманитарного знания, занимающаяся комплексным изучением природы, населения, хозяйства, истории и культуры какой-либо территории. В этнологии действует преимущественно научный подход, в краеведении сочетаются научные и ненаучные подходы. Преследованиям и практически полному уничтожению в начале 1930-х годов подверглось именно краеведение как сфера, где могли действовать люди, не входящие в государственные структуры и объединяющиеся самостоятельно, что представляло опасность для тоталитарного государства. Этнология же как академическая наука сохранялась, хотя и в жёстких идеологических рамках.

От «Кружка по изучению Северного края» к Этнографическому обществу

Официальной датой основания Научного этнографического общества при Пермском государственном университете (ПЭО) считается 19 декабря 1929 г., когда его устав был «утвержден и само оно было зарегистрировано в Пермском Адмтделе Окрика» [4]. Однако его корни, как справедливо отмечал основатель общества П.С. Богословский, уходили значительно глубже – к осени 1916 г., ко времени организации научного «Кружка по изучению Северного края» (КИСК) при Пермском университете [4]. Создание ПЭО было не столько результатом государственного заказа, сколько продолжением дореволюционной традиции общественной инициативы в науке. Советская власть скорее стимулировала поиск компромиссов и вынужденных соглашений с властью, но не была единственным и главным инициатором создания таких обществ.

Ключевой фигурой, связавшей дореволюционные традиции краеведения с новыми советскими реалиями, стал Павел Степанович Богословский (1890–1966). Окончив Пермскую духовную семинарию и Петербургский историко-филологический институт, он вернулся в Пермь и с 1917 г. был зачислен профессорским стипендиатом по кафедре русского языка и словесности в только что открывшийся университет [5]. Он быстро стал одним из лидеров местной научной интеллигенции.

Вместе со своими наставниками – профессором-медиевистом А.П. Кадлубовским и библиотекарем И.Г. Раевым – Богословский участвовал в фольклорно-этнографической экспедиции 1917 г. по Каме и Вишере, которая стала образцом комплексного подхода к изучению края. В Чердыни, благодаря помощи купцов Алиных, была с потрясающей достоверностью воссоздана народная свадьба. Богословский писал об этом с восхищением: «Мы получили возможность наблюдать и записать замечательную картину – чердынскую свадьбу... Арсений Петрович прямо ликовал» [5]. К сожалению, эти уникальные материалы были утрачены в годы Гражданской войны, и учёный впоследствии с горечью констатировал: «...последующие после поездки в 1917 году политические события разбросали собранные нами научные материалы... Серьёзная, очень тяжелая утрата для науки!» [5]. Тем не менее, заложенная

методика и комплексный подход были в полной мере реализованы уже в деятельности Кружка и созданного на его основе Этнографического общества.

К концу 1920-х гг. формат узкоспециализированного кружка был признан не соответствующим масштабу задач. В записке от 26 октября 1929 г., направленной проректору Пермского университета, Богословский обосновывал необходимость преобразования, подчёркивая, что Урал и Прикамье нуждаются «в планомерном и научном обследовании» и что необходимо создать при университете «научно-этнографический центр» [6]. Таким образом, 19 декабря 1929 г. КИСК был преобразован в Научное Этнографическое Общество при Пермском университете (ПЭО) [4]. Уже 27 декабря начало работу временное бюро, а 15 января 1930 г. на общем собрании было избрано постоянное Правление во главе с председателем П.С. Богословским. В состав правления также вошли ректор университета С.А. Стойчев (заместитель П.С. Богословского), А.П. Стеблев (учёный секретарь) и студенты, что подчеркивало курс на вовлечение молодежи [4].

Общесоюзный тренд и место ПЭО в системе координат

Создание ПЭО было не изолированным локальным событием, а частью общероссийского процесса становления этнологии как полноценной академической дисциплины. Кульминацией этого процесса в столице стало создание в Московском университете в апреле 1925 г. самостоятельного этнологического факультета [7]. Решение о его организации было принято Народным комиссариатом просвещения РСФСР, а 17 апреля 1925 г. вышло постановление СНК, объявившее этнологический факультет преемником упразднённого историко-филологического факультета. Перед новым факультетом ставилась амбициозная задача по подготовке «работников в области культурного строительства народов СССР» [7]. Первый набор в мае 1925 г. составил 160 человек, а в структуру факультета вошли четыре отделения: историко-археологическое, этнографическое, литературное и изобразительных искусств [8].

Создание столь крупного специализированного подразделения в ведущем вузе страны наглядно демонстрирует высокий статус этнологии в середине 1920-х годов и её востребованность в решении государственных задач культурного строительства. Заметим, что это движение затронуло и другие регионы. На Урале, в Свердловске, в 1924 г. было создано Общество изучения Урала, Сибири и Дальнего Востока, имевшее этнографическую секцию [9]. Активно работало и Общество изучения Коми края, созданное в Усть-Сысольске 16 мая 1922 г. по инициативе видного этнографа А.Н. Грена, будущего члена ПЭО [10].

Сравнивая ПЭО с этими центрами, следует отметить, что по своим организационным принципам оно было ближе к уральскому обществу в Свердловске, также являвшемуся региональным объединением, а не центральным академическим институтом. Однако ПЭО отличала более узкая этнографическая специализация, в то время как свердловское общество носило комплексный краеведческий характер. Что касается масштабов, то ПЭО уступало столичному этнологическому факультету, но играло ключевую роль как координатор этнографических исследований на Среднем Урале. В этом ключе создание этнографического общества в Перми и открытие этнологического факультета в МГУ были звеньями одной цепи – процесса институционализации и централизации гуманитарной науки в СССР, при этом ПЭО сохраняло преемственность с дореволюционной краеведческой традицией.

Организационная структура, научная и просветительская работа ПЭО

К лету 1930 г. в ПЭО состояло 75 человек. Для организации системной работы было создано несколько специализированных комиссий, что демонстрирует высокий уровень профессионализма его членов.

Фольклорная комиссия (руководитель П.С. Богословский) делала ставку на коллективность и плановость: «основная работа проводится по бригадам» [4]. Уникальной чертой стала тесная связь с учебным процессом: задания на каникулы получили 118 студентов [4].

Диалектологическая комиссия (руководитель профессор А.В. Миртов) взяла на себя проект создания «областного уральского словаря». Для этого была издана и распространена специальная анкета тиражом 2000 экземпляров [4]. В состав комиссии входили В.Н. Серебренников, доцент Л.П. Лобов, П.С. Богословский, Е.П. Аликин (крестьянин-краевед), И.Г. Остроумов (служащий, краевед), А.П. Стеблев, студентка Ильинская и др. [4]. Валентин Николаевич Серебренников, этнограф-собиранье, передал в комиссию «лично собранные за 28 лет (с 1902 по 1930 г.) материалы по говорам бывшего Оханского уезда» [4]. П.С. Богословский передал полученный им в 1925 г. от уральского краеведа В.П. Бирюкова большой рукописный словарь шадринских говоров [4].

Музыкально-этнографическая комиссия (руководитель А.А. Луканин, заведующий музыкальным педагогическим техникумом) была одной из самых активных. Её деятельность включала как полевой сбор и изучение народной музыки, так и обязательную просветительскую работу. Уже к лету 1930 г. комиссия подготовила к изданию «сборник песен Пермского края из 25 номеров», составленный из записей Тезавровского, Некрасова, Истомина, Будрина, Вологодского в обработке Гречанинова, Некрасова, Лядова, Тезавровского, Лобачева и Луканина [4]. В.А. Бибичева составила список музыкально-этнографических сборников для комплектования библиотеки, Д.В. Смирницкий начал работу по составлению музыкально-этнографической библиографии [4].

Угро-финская комиссия (руководитель профессор-ориенталист Алексей Николаевич Грен) сосредоточилась на комплексном изучении финно-угорских народов Урала и Поволжья. План её работ был чрезвычайно широк – от определения прародин уgro-финнов до анализа современной литературы этих народов [4]. В мае 1930 г. в состав комиссии вошла «Историко-колониционная комиссия» (проф. А.А. Савич, А.П. Пьянков), что усилило исторический аспект исследований.

Комиссия по изучению театрального быта и народного театра (организатор – театральный деятель Андрей Иванович Чайкин) к лету 1930 г. ещё не была окончательно оформлена, но уже провела совместно с Литературно-Театральным музеем вечер памяти В.В. Маяковского [4]. Из отчета А.И. Чайкина: «11 июля театральной комиссией Этнографического общества, совместно с Литературно-театральным музеем Пермского Университета, был организован и проведен в Клубе ученых вечер памяти В.В. Маяковского...» [11].

Секция по изучению быта, языка и творчества детей (руководитель – доктор-педиатр П.И. Ильинский) отражала новаторский социально-гигиенический подход. Она разработала подробнейшую программу изучения быта детей в 22 типах учреждений – от детских садов до учреждений для малолетних преступников [4].

Наиболее ярким примером практической деятельности ПЭО стала Коми-Печорская экспедиция 1930 г. Из-за катастрофической нехватки средств в поездку отправились лишь двое – В.Н. Серебренников и Г.И. Марков, получивший «весьма скромную командировочную... сумму – 125 рублей» [12]. Это ярко иллюстрирует проблему, описанную в отчёте: «Пермское Этнографическое Общество приступило к своей деятельности без средств, мало того... с долгами» [4]. Несмотря на это, экспедиция оказалась уникальной. Г.И. Марков, «не имея при себе фонографа... вынужден был использовать привычный для него способ записи напевов на слух», но его полевой дневник содержал 19 образцов песен, а также уникальную народную драму «Шайка разбоев» от 101-летнего сказителя Самойлы Пыстина [12]. Собранные материалы, по-видимому, не были опубликованы отдельно, однако вошли в состав отчётных документов и частично использованы в публикациях Г.Н. Мехнецовой [12], что позволяет говорить об их сохранности в архивных фондах.

Параллельно с экспедиционной работой ПЭО вело активную просветительскую деятельность. Этнографические концерты 13 и 27 июня 1930 г. представляли собой синтез науки и искусства. Концерту «предшествовало слово проф. А.В. Миртова и доклад А.А. Луканина. Исполнение сопровождалось комментариями» [4]. Всего за первое полугодие было проведено 59 докладов и 6 публичных выступлений [4].

Финансовая несамостоятельность и идеологическая адаптация

ПЭО, будучи формально независимой организацией, на деле полностью зависело от государственного финансирования. Анализ финансовой документации других краеведческих обществ, например Курского, выявляет общую для всей страны тенденцию. Членские взносы составляли мизерную долю бюджета (в 1927 г. – 12,4%, а в 1928-1929 гг. – всего 0,8% от доходов), и основным источником существования были государственные субсидии [1]. Подобная ситуация, естественно, ставила краеведов в полную зависимость от идеологического заказа.

Деятельность ПЭО сознательно выстраивалась в соответствии с этим заказом. В устанавочных докладах Богословского были сформулированы принципы: плановость и связь с социалистическим строительством, обобществление и массовость [4]. Общество открыто заявило о готовности к социалистическому соревнованию с другими научными объединениями Перми [4]. Этот публичный пафос был не просто данью времени, а вынужденной стратегией легитимации гуманитарного знания. Показательно звучит тезис отчета: «Не следует забывать и об основной производительной силе... именно человеку» [4].

Закат общества

Расцвет ПЭО оказался недолгим. В начале 1930-х гг. политический курс СССР кардинально изменился. «Золотое десятилетие» поддержки национальных культур и краеведения завершилось [13], произошел глубинный идеологический перелом, сделавший этнологию «политически вредной» наукой. Этнология оказалась «вредной» по нескольким причинам: она по определению изучала культурную «инаковость», а в новой парадигме акцент на различиях расценивался как сепаратизм; её материал демонстрировал устойчивость национальных традиций, что противоречило официальному тезису о скором слиянии всех культур в единую социалистическую.

Административные последствия не заставили себя ждать. В 1930 г. был ликвидирован этнологический факультет МГУ, просуществовавший всего пять лет; вскоре закрылось этнографическое отделение в ЛГУ [7; 14]. Высшее этнографическое образование в стране фактически прекратилось на восемь лет. Этнографию свели к роли вспомогательной исторической дисциплины, а любые самостоятельные общественные организации, подобные ПЭО, попали под подозрение.

На этом фоне судьба Пермского этнографического общества была предрешена. В 1932 г. П.С. Богословский вынужденно покинул Пермь, а в 1935 г. был арестован по статье 58 и до 1940 г. находился в КарЛАГе [5]. Профессор А.Н. Грен, один из ведущих членов Угро-финской комиссии, скончался в 1932 г. [15]. Имеются сведения и о преследованиях других членов общества: В.Н. Серебренников, передавший в комиссию свои 28-летние записи, также подвергся репрессиям (его имя фигурирует в следственных делах 1930-х годов). Документов о формальном закрытии ПЭО пока не обнаружено, однако после 1930 г. его деятельность в доступных источниках не прослеживается. Общество разделило судьбу большинства краеведческих и этнографических объединений страны, став жертвой новых идеологических установок.

Заключение

Пермское этнографическое общество стало ярким эпизодом в истории региона 1920-30-х гг. Оно выросло из дореволюционной традиции краеведения, но было вынуждено адаптироваться к советским реалиям. ПЭО успешно институционализировалось, создав разветвлённую структуру и проведя уникальные полевые исследования, опираясь на детально разработанные методики, примеры которых демонстрируют высокий профессиональный уровень его членов. Однако именно то, что ПЭО было самостоятельным общественным объединением, а не государственным учреждением, предопределило его судьбу в условиях ужесточения идеологического контроля. Разгром краеведения и сужение поля для этнологии сделали невозможным существование подобных обществ на местах.

Библиографический список

1. *Листопад К.А.* Краеведение, власть, сметы: анализ финансовой документации краеведческих организаций в 1920–1930 гг. через призму советской идеологии (на примере Курской губернии) // *Экономическая история*. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 26–33.
2. *Шнирельман В.А.* Злоключения одной науки: этногенетические исследования и сталинская национальная политика // *Этнографическое обозрение*. – 1993. – № 3. – С. 52–68.
3. *Гладышев В.Ф.* В списке разыскиваемых (о поисках могилы учёного-географа И.Я. Кривощёкова) // *I Кривощёковские историко-архивные чтения : сборник материалов научной конференции (28 марта 2019 г., г. Кудымкар)*. – Кудымкар, 2019. – С. 38–48.
4. *Богословский П.С.* Научное Этнографическое Общество при Пермском Государственном Университете: структура, состав, план работы и предварительные краткие отчетные данные о деятельности пермского этнографического общества за первое полугодие его существования (январь–июль 1930 г.), с приложением устава общества / П. С. Богословский. – Пермь : Тип. изд-ва «Звезда», 1930. – 33 с.
5. *Николаева Н.Л.* Воспоминания П.С. Богословского о создании Пермского университета и экспедиции 1917 года // *Ежегодник Рукописного отдела Пушкинского Дома на 2015 год*. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 409–427.
6. Государственный архив Пермского края (ГАПК). Ф. Р-180. Оп. 1. Д. 173.

7. *Казьмина О.Е.* Кафедра этнологии – место науки и романтизма // *Этнографическое обозрение*. – 2023. – № 3. – С. 54–71.
8. Этнологический факультет Московского университета: страницы истории // *Вестник исторического факультета МГУ*. – 2021. – № 2 (29). – С. 15–28.
9. Государственный архив Пермского края (ГАПК). Ф. р-973. Оп. 1. Д. 504. Л. 1.
10. *Жеребцов И.Л., Попов А.А.* А.Н. Грен и Общество изучения Коми края. Материалы к III Международным Иналиповским чтениям (Сухум, 4–6 октября 2016 г.). – Сыктывкар: ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН, 2016. – 24 с.
11. Государственный архив Пермского края (ГАПК). Ф. Р-944. Оп. 1. Д. 31.
12. *Мехнецова Г.Н.* Музыкально-этнографическая экспедиция пермского Научного этнографического общества на Печору в 1930 году // *Фольклорные традиции Севера и Северо-Запада России: ареальные исследования в контексте этнокультурных взаимосвязей : сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции (Санкт-Петербург, 27–30 сентября 2014 г.)*. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 3–19.
13. *Каменских М.С.* «Русский поворот» в национальной политике СССР начала 1930-х годов: оценки отечественной и зарубежной историографии // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН*. – 2019. – № 4. – С. 93–97.
14. Материалы по истории Санкт-Петербургского университета. 1917–1965: обзор архивных документов. – Санкт-Петербург, 1999. – С. 66–67.
15. Грен Алексей Николаевич (1862–1932) // Профессора Пермского государственного университета : биографический справочник. – Пермь: Издательство Пермского университета, 2001. – С. 57–58.

Благодарности:

Исследование выполнено в рамках Государственного задания №126071523331-6 «Русские в регионах УрФО: полевые и стационарные исследования (2026–2028 гг.)».

Для цитирования:

Кочеров А.А. Пермское этнографическое общество в 1920-30 е гг. // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2026. – № 3. – С. 137–144. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.10>

Сведения об авторе:

Кочеров Андрей Алексеевич, стажер-исследователь, Институт гуманитарных исследований УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИГИ УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4; e-mail: kocherov.a.andrey@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-2974-3794

PERM ETHNOGRAPHIC SOCIETY IN THE 1920s–1930s

Kocherov A.A.

Institute of Humanitarian Studies UB RAS, Perm

The article examines the history of the foundation and activities of the Perm Ethnographic Society (PES) against the backdrop of key processes in Soviet science and politics of the 1920s–1930s. The origins of the organization, which go back to the pre-revolutionary «Circle for the Study of the Northern Region» (CSNR), and its institutionalization in 1929 are shown. The role of P. S. Bogoslovsky, who initiated the transformation of the circle into a society and became its chairman, is highlighted in the article. It argues that the emergence of the PES became part of an all-Russian trend towards the institutionalization of ethnology, culminating in the establishment of the Faculty of Ethnology at Moscow State University (1925). Based on archival materials and published sources, the structure of the PES and its commissions, its publishing and expeditionary activities, and its ideological adaptation are reconstructed.

Keywords: *Perm Ethnographic Society, Circle for the Study of the Northern Region, P.S. Bogoslovsky, A.N. Gren, local history, ethnography, folklore, Perm University, Urals*

Поступила в редакцию: 29.06.2026

Принята к публикации: 16.07.2026