

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА

№ 4 ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ 2025

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

Главный редактор

академик РАН *В.П. Матвеевко*

Редакционная коллегия

академик РАН *А.А. Барях*
академик РАН *Н.В. Зайцева*
академик РАН *И.Б. Ившина*
академик РАН *А.А. Иноземцев*
чл.-корр. РАН *Л.Ю. Левин*
чл.-корр. РАН *В.Ю. Мишланов*
канд. экон. наук *И.П. Огородов*
д-р физ.-мат. наук *А.И. Мизев*
чл.-корр. РАН *О.А. Плехов*

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

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук *А.Г. Воотинова*

Адрес редакции журнала:

614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13А
тел.: (342) 212-40-64
e-mail: vestnik@permsc.ru

PERM FEDERAL RESEARCH CENTER JOURNAL

№ 4 OCTOBER – DECEMBER 2025

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

Editor-in-Chief

Academician *V.P. Matveenko*

Editorial Board

Academician *A.A. Baryakh*

Academician *N.V. Zaytseva*

Academician *I.B. Ivshina*

Academician *A.A. Inozemtsev*

RAS corresponding member *L. Yu. Levin*

RAS corresponding member *V. Yu. Mishlanov*

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

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

RAS corresponding member *O.A. Plekhov*

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

RAS corresponding member *V.N. Strelnikov*

RAS corresponding member *M.I. Sokolovskii*

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

RAS corresponding member *Eu. G. Furman*

RAS corresponding member *O.V. Khlynova*

RAS corresponding member *A.V. Chernykh*

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

RAS corresponding member *T.V. Gavrilova*

Executive Editor

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

Editorial office address:

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

tel.: (342) 212-40-64

e-mail: vestnik@perm-sc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 4/2025

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

- Пунегов В.В., Патов С.А., Скроцкая О.В.*
Оценка возможности исчерпывающей экстракции мангиферина из надземной части растения-интродуцента *Hedysarum alpinum* L. в условиях микроволновой активации процесса 6
- Синцова Т.Н., Лепихин А.П., Розенталь О.М., Левин Л.Ю., Богомолов А.В.*
Статистические аспекты внутрисуточных колебаний показателей качества воды (на примере Камского водохранилища) 17
- Полюдова Т.В., Антипова М.В., Лобанов А.Н., Ерошенко Д.В.*
Обзор подходов к определению антибактериальной активности новых природных и синтетических соединений 36
- Шишков Д.Г., Корляков К.Н., Лисина Т.Н., Ямалтдинова В.Р.*
Использование побочных продуктов переработки К-гидратов руд и животноводства для получения мини-клубней картофеля в условиях защищенного грунта 49
- Смоляк А.А., Шкляев Ю.В.*
Гетероциклизации некоторых непредельных соединений под действием элетрофильных агентов 62
- Степанов Р.А.*
Моделирование аэродинамических характеристик профиля крыла с использованием искусственных нейронных сетей 74
- Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В., Сологуб Ф.Д.*
Деформационный мониторинг здания на многолетнемерзлых грунтах ... 80
- Лекомцев С.В.*
Пассивное демпфирование колебаний пластины из функционально-градиентного материала 87

ИЗ ИСТОРИИ РОДНОГО КРАЯ

- Крыласова Н.Б.*
Городище Анюшкар – задачи и перспективы новых исследований 95

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО

- Пантелеев И.А., Изюмова А.Ю.*
От ударных волн до механобиологии живых систем!
К 75-летию со дня рождения Олега Борисовича Наймарка 108
- Строим жизнь в науке по правилам академика
Ирины Борисовны Ившиной 118
-

CONTENTS

OCTOBER – DECEMBER 4/2025

RESEARCH: THEORY AND EXPERIMENT

- Punegov V.V., Patov S.A., Skrotskaya O.V.*
Evaluation of the possibility of exhaustive extraction of mangiferin from the above-ground part of the introduced plant *Hedysarum alpinum* L. under conditions of microwave activation of the process 6
- Sintsova T.N., Lepikhin A.P., Rozental O.M., Levin L.Y., Bogomolov A.V.*
Statistical aspects of daily fluctuations of water quality indicators (on the example of the Kama reservoir) 17
- Polyudova T.V., Antipyeva M.V., Lobanov A.N., Eroshenko D.V.*
A review of approaches to determining the antibacterial activity of new natural and synthetic compounds 36
- Shishkov D.G., Korlyakov K.N., Lisina T.N., Yamaltdinova V.R.*
The use of by-products of animal husbandry and K-mg ore processing for potato mini-tubers production in a greenhouse 49
- Smolyak A.A., Shklyaev Yu. V.*
Heterocyclization of some unlimited compounds under the action of electrophilic agents 62
- Stepanov R.A.*
Modeling aerodynamic characteristics of a wing airfoil using artificial neural networks 74
- Gusev G.N., Epin V.V., Tsvetkov R.V., Sologub F.D.*
Deformation monitoring of buildings on permafrost soils 80
- Lekomtsev S.V.*
Passive vibration damping of a plate made of functionally graded material .. 87

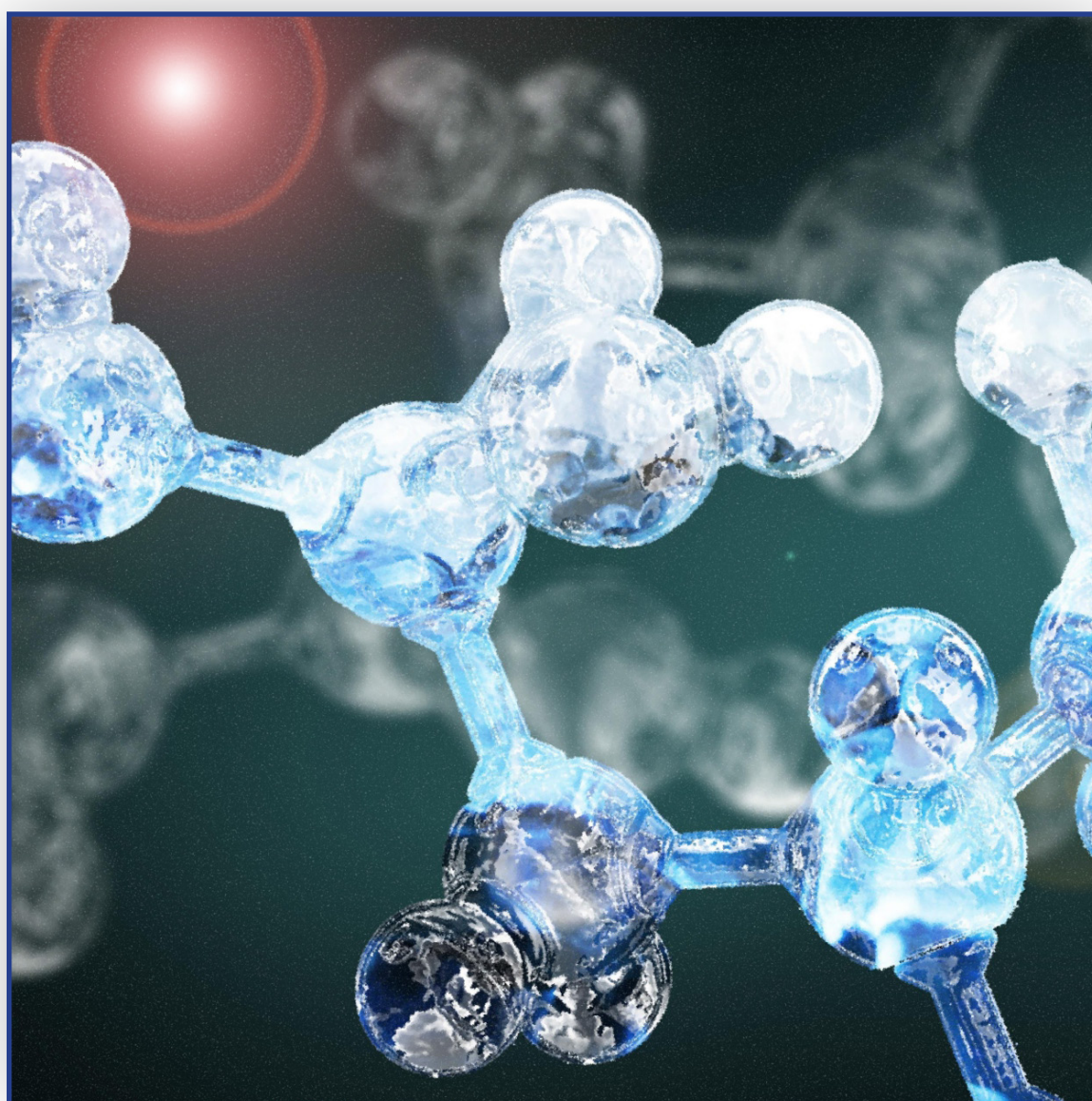
FROM THE HISTORY OF THE NATIVE LAND

- Krylasova N.B.*
Anyushkar settlement: tasks and prospects for new research. 95

ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

- Panteleev I.A., Izyumova A. Yu.*
From shock waves up to mechanobiology of living systems!
On the 75th anniversary of Oleg Borisovich Naimark 108
- Building a Life in Science According to the Rules of Academician
Irina Ivshina 118
-

***ИССЛЕДОВАНИЯ:
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ***



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСЧЕРПЫВАЮЩЕЙ
ЭКСТРАКЦИИ МАНГИФЕРИНА ИЗ НАДЗЕМНОЙ
ЧАСТИ РАСТЕНИЯ-ИНТРОДУЦЕНТА
HEDYSARUM ALPINUM L. В УСЛОВИЯХ
МИКРОВОЛНОВОЙ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА*

В.В. Пунегов, *Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

С.А. Патов, *Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

О.В. Скроцкая, *Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

Для цитирования:

Пунегов В.В., Патов С.А., Скроцкая О.В. Оценка возможности исчерпывающей экстракции мангиферина из надземной части растения-интродуцента *Hedysarum alpinum* L. в условиях микроволновой активации процесса // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 6–16. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.1>

Исследована зависимость выхода и чистоты мангиферина из фитомассы копеечника альпийского *Hedysarum alpinum* L. (Fabaceae), интродуцированного в Ботаническом саду Института биологии Коми научного центра, от концентрации спирта в экстрагенте в условиях микроволновой активации процесса экстракции. Установлено, что максимальный выход мангиферина – 1,87-2,0%, достигается при концентрации спирта в экстрагенте 10-30% или 80%, мощности излучения 800 Вт в объеме камеры СВЧ, суммарной продолжительности стадий экстракции 9 мин и гидромодуле процесса, равном восьми.

Ключевые слова: мангиферин, экстракция, микроволновое излучение, ВЭЖХ-МС-, УФ-, ЯМР-спектроскопия, *Hedysarum alpinum*, интродукция.

Введение

Мангиферин – природное соединение растительного происхождения, имеющее структуру 1,3,6,7-тетрагидроксиксантон-2-С-глюкопиранозида. Это известное биологически активное вещество, выделяемое из различных видов растений для использования в фармакологии. Мангифе-

рин обладает противодиабетическими, кардиопротекторными, антиоксидантными, противоопухолевыми и гепатопротекторными свойствами, применяется при лечении гепатита и кожных заболеваний [1, 2, 3]. Растительным сырьем для получения мангиферина являются в основном листья и кора *Mangifera indica* L. (манго

* Работа выполнена на экспериментальной базе УНУ «Научная коллекция живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН» (регистрационный номер 507428) и оборудовании ЦКП «Хроматография» Института биологии Коми НЦ УрО РАН в рамках государственного задания по теме «Оценка влияния климатических условий Севера на процессы репродукции ресурсных растений», номер государственной регистрации 125021302139-3.

индийское), *Curcuma amada* Roxb. (куркума амада), а также надземная масса некоторых видов рода *Hedysarum* (Копеечник) – *Hedysarum alpinum* L., *Hedysarum theinum* Krasnob. [4, 5, 6, 7]. Из надземной части *H. alpinum* был получен препарат «Алпизарин», который, согласно доклиническим исследованиям, оказывает прямое ингибирующее действие на вирус простого герпеса, цитомегаловирус, а также влияет на выработку γ -интерферона, обладает иммуностимулирующей активностью [8].

Результаты интродукционных исследований в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми показали высокую перспективность культивирования *H. alpinum* с целью расширения сырьевой базы для производства мангиферина и лекарственных препаратов, его содержащих [9, 10]. *H. alpinum* – многолетнее травянистое растение из семейства Fabaceae (Бобовые), включенное в Красную книгу Республики Коми (категория статуса редкости 3), редкий вид с естественно низкой численностью; лимитирующими факторами и угрозами являются реликтовость и изолированность отдельных популяций на северном пределе распространения вида. Ареал вида евразийский – северные районы Монголии, Китая, Кореи, север, северо-восток европейской части России, Урал, Западная и Восточная Сибирь и Дальний Восток с арктическими районами [11]. *H. alpinum* – ценное лекарственное растение, не обеспеченное естественной сырьевой базой. В научную коллекцию живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН вид привлечен в 1994 году из ВИЛАР (Москва), и по итогам первичного интродукционного изучения он вошел в группу перспективных лекарственных растений для дальнейшего культивирования в Республике Коми. В настоящее время в коллекции лекарственных растений сохраняется

и изучается третья местная репродукция *H. alpinum*. Подробно была изучена морфология растений в прегенеративном и генеративном периодах онтогенеза, установлен возраст перехода растений в соответствующие онтогенетические состояния. Показано, что сезонные ритмы роста и развития данного вида в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми стабильны и растения приспособлены к почвенно-климатическим условиям Севера. Также определено, что особи второго – восьмого годов жизни отличаются значительными показателями надземной сырьевой фитомассы (7-9 г/на побег) с высоким содержанием мангиферина, что говорит о целесообразности продолжения изучения данного лекарственного растения с целью дальнейшей разработки технологии культивирования в северном регионе и совершенствования условий получения мангиферина. В данной работе отражены результаты оптимизации условий получения мангиферина с активацией процесса экстракции целевого продукта микроволновым излучением.

Экспериментальная часть.

Растительный материал

Надземная масса *H. alpinum* была собрана с экспериментальных участков в Ботаническом саду Института биологии Коми НЦ УрО РАН в фазе массового цветения, высушена до воздушно-сухого состояния воздушно-теньевым способом и перемолота на лабораторной мельнице до степени измельчения менее 0,25 мм. По данным ВЭЖХ анализа, содержание мангиферина в указанном образце растительного сырья составляло $2,0 \pm 0,2$ % в пересчете на абсолютно сухое сырье (что несколько уступает свежесобранному воздушно-сухому сырью), однако это так же говорит о его хорошем качестве (так, например, содержание мангиферина в траве *H. alpinum*, заготовленной в 2022

и 2023 годах в Ботаническом саду ВИЛАР (Москва), составляло 2.55 % и 1.66 % соответственно [12]; трава копеечника кавказского (*H caucasicum* M. Vieb.), близкого вида, также рекомендуемого в качестве лекарственного растения, произрастающего на территории Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик Северного Кавказа, содержит мангиферин в количестве 0,13–0,15 % [13].

Микроволновая экстракция (МАЭ)

Микроволновая экстракция проводилась с использованием микроволновой печи (LG, модель MS2322T; 230В, ~50Гц) в открытой системе сосудов. Навеску травяной муки 100 г вносили в химический стакан емкостью 1,2 дм³, подливали водный раствор спирта этилового в объеме 800 см³. Гидро модуль процесса (отношение объема жидкости к массе сухого сырья, используемого для экстракции мангиферина, см³/г) равен восьми из-за сильного набухания сырья в экстрагенте. Стакан с суспензией выдерживали в микроволновой печи 1 мин. с нагревом содержимого до 36 °С, извлекали, перемешивали суспензию, повторно вносили в микроволновую печь на 1 мин. При этом суспензия разогревалась до 48 °С, снова извлекали, перемешивали содержимое стакана и третий раз помещали в СВЧ печь на 1 мин. В процессе происходил разогрев суспензии до 62 °С с признаками начала поверхностного кипения экстрагента. Мощность СВЧ излучения была равна 800 Вт. Суспензию сырья в экстрагенте остужали до 40 °С и фильтровали экстракт на воронке Бюхнера через бумажный фильтр «синяя лента» в вакууме водоструйного насоса. Шрот с фильтра переносили в исходный химический стакан и экстрагировали целевое вещество аналогичным образом ещё два раза. Экстракты объединяли и концентрировали на

роторном испарителе ИР-1М (ЗАО «Химлаборприбор», г. Клин, РФ) до водного остатка объемом 50-80 мл. Все эксперименты по экстракции целевого вещества выполняли в трехкратной повторности.

Очистка экстракта от сопутствующих веществ

Водный остаток, полученный после концентрирования спиртового экстракта, количественно переносили в делительную воронку и пятикратно экстрагировали неполярные липиды хлороформом по методике, отраженной в авторском свидетельстве на изобретение [9]: (трехкратно с расходом 100 мл хлороформа и двукратно – по 50 мл хлороформа). Хлороформные извлечения отделяли от водного остатка центрифугированием на лабораторной центрифуге Heinz Janetzki T23 (Чехословакия) и подвергали рекуперации растворителя.

Из водного остатка в делительной воронке экстрагировали мангиферин н-бутанолом шестикратно с использованием по 100 мл н-бутанола на каждой стадии. Бутанольные реэкстракты отделяли от водного остатка центрифугированием на лабораторной центрифуге Heinz Janetzki T23, объединяли, концентрировали на роторном испарителе до сухого остатка. Сухой остаток, представляющий собой концентрат технического мангиферина, количественно переносили в химический стакан емкостью 250 см³, растворяли в 100 мл 60% (v/v) этанола, нагревали в СВЧ печи до 68 °С и полного растворения осадка, фильтровали. Раствор остужали до комнатной температуры. При этом происходило выпадение осадка бежевого цвета – мангиферина. Для окончательной кристаллизации стакан с материалом помещали в морозильную камеру (-10 °С) на 2 – 5 суток. Осадок отфильтровывали через мембранный фильтр с размером пор 45 мкм. Продукт

на фильтре промывали с использованием 10 мл 96 %-го этанола, охлажденного до -10 °С. Мангиферин высушивали в течение 1,5 ч. в сушильном шкафу при 115 °С, определяли выход продукта весовым методом. Маточный раствор концентрировали до сухого остатка и аналогичным образом перекристаллизовывали продукт при охлаждении, получали дополнительную массу мангиферина. Данные по выходу мангиферина и его зависимости от концентрации спирта в экстрагенте отражены в таблице.

Анализ мангиферина методом ВЭЖХ

Аналитические исследования выполняли по методике, отраженной в публикации Y.-J. App Li, K.-S. Bi (2003) [14] и адаптированной нами для применения микроколоночного аналитического хроматографа «Милихром-5». Полученные образцы мангиферина и маточные растворы после кристаллизации продукта анализировали методом микроколоночной обращенно-

фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием аналитической хроматографической системы «Милихром-5», оснащенной аналитической колонкой Диасфер С18 (с размером зёрен сорбента 5 мкм, внутренним диаметром 2 мм и длиной 80 мм) и УФ-детектором при 320 нм с применением градиентного режима элюирования (ЗАО «Медикант», г. Орел, РФ), а также петлевым дозатором емкостью 5 мкл. Для аналитических исследований приготовили образцы растворов мангиферина с концентрацией 5 мкг/мл в 50%-ном этаноле в мерных колбах емкостью 100 см³. ВЭЖХ анализ выполняли при детектировании хроматографического сигнала на длине волны детектора 320 нм в режиме градиентного элюирования компонентов из колонки. Элюент А – 1 % уксусная кислота в воде, элюент В – ацетонитрил марки «0», программа градиента – 0–20 мин. 0–100% В. Объемная скорость элюирования компонентов из аналитической колонки – 100 мкл/мин.

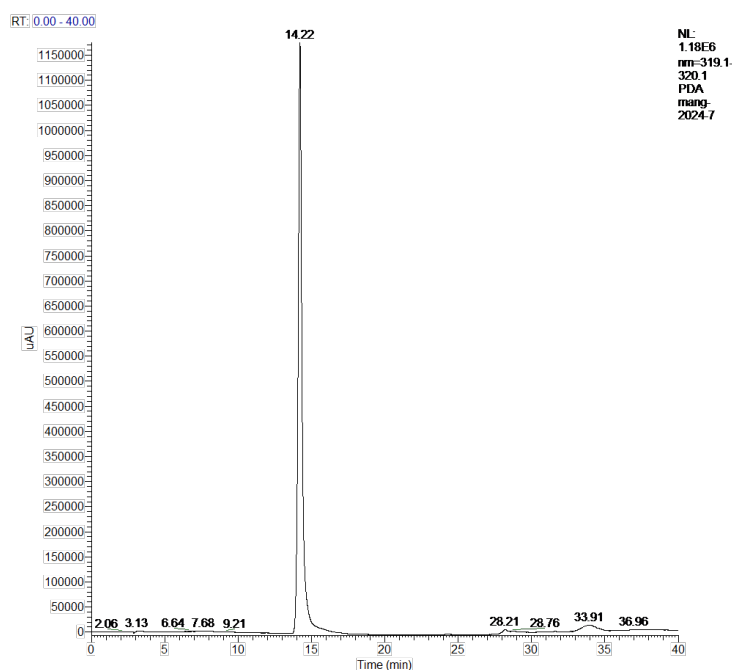


Рис. 1. Хроматограмма образца № 8 (см. табл.) мангиферина, полученная методом ОФ-ВЭЖХ-PDA (диодно-матричный детектор) при детектировании на длине волны 320,1 нм. По вертикали: интенсивность хроматографического сигнала, μV , по горизонтали: время хроматографического удерживания компонентов в аналитической колонке, мин., для мангиферина это значение соответствует 14.22 мин.

Для получения калибровочной зависимости интегральной интенсивности хроматографического сигнала от концентрации мангиферина в анализе использовали растворы рабочего стандартного образца мангиферина с массовой долей 98 %, полученного нами ранее в соответствии со способом, приведенным в патенте [14]. Калибровочная зависимость линейна в области концентраций мангиферина от 0,2 мкг/мл до 12 мкг/мл при поглощении УФ-излучения растворами аналита на длине волны 320 нм.

Образцы мангиферина исследовали методом ВЭЖХ-МС в лаборатории физико-химических методов исследования в Институте химии Коми НЦ УрО РАН с целью подтверждения качественных характеристик полученных веществ и возможной природы сопутствующих примесей.

Хромато-масс спектрометрический анализ компонентного состава образца №8 мангиферина (таблица). Анализ выполнен с применением системы ВЭЖХ-МС LCQ Fleet (Thermo, США). Разделение компонентов осуществляли на колонке ODS Hypersil C18 (2×100 мм, 5 мкм зерно) в градиентном режиме элюирования в системе растворителей – ацетонитрил (А): 10% водный раствор муравьиной кислоты (В). Режим элюирования: А : В – 0 : 100 (30 мин) – 100 : 0 (10 мин) – 0 : 100, скорость элюирования 0,5 мл/мин, температура колонки 30 °С, длина волны при детектировании 320 нм (диодно-матричный детектор (PDA)) и по полному ионному току (МС-детектор). Условия МС: напряжение на капилляре 5 кВ, поток газа осушителя (гелий) – 7 дм³/мин, температура 275 °С, сканирование масс в режиме регистрации положительных ионов [M⁺] в диапазоне масс (m/z) 100 – 2000. Хроматограмма приведена на рис. 1, а масс-спектр мангиферина – на рис. 2.

УФ-спектр поглощения мангиферина получен на спектрофотометре UV-Vis

1700 Shimadzu (Япония). Как следует из рис. 3, спектр образца мангиферина в УФ – области характеризуется тремя интенсивными полосами поглощения с максимумами при длинах волн 258,5, 316,5 и 367 нм и практически идентичен спектру поглощения мангиферина, получаемого по патенту США [15].

Определение температуры плавления мангиферина

Температура плавления образцов мангиферина была определена с применением столика Кофлера. Установлено, что мангиферин плавится при температуре 269-270 °С с разложением.

Обсуждение результатов

H. alpinum является перспективным и альтернативным, по отношению к листьям и коре манго, сырьевым источником для получения мангиферина. При выращивании в лесной зоне Западной Сибири особи *H. alpinum* синтезируют до 3,0% мангиферина и 4,1% суммы ксантонов [5, 16, 17]. В сырьевой массе растения *H. alpinum*, культивируемого в среднетаежной подзоне Республики Коми, на основании данных ВЭЖХ анализа нами было установлено, что содержание мангиферина в листьях варьирует от 3,9 до 5,7 % в фазы бутонизации и цветения в пересчете на абсолютно сухое сырье [9]. К тому же полагаем, что оптимальными сроками заготовки сырья в условиях Севера следует считать фазы массовой бутонизации и начала цветения, характеризующиеся наиболее высоким содержанием ксантонов, при этом следует учитывать, что в фазу цветения в ряде случаев отмечается меньше веществ, чем в фазу бутонизации.

Многочисленные научные работы приводят данные о технологических преимуществах применения микроволновой активации экстракции мангиферина (microwave assisted extraction (MAE)) из

листьев *Mangifera indica*, *Curcuma amada* [3, 18, 19, 20]. В данной работе усилия были направлены на оптимизацию некоторых условий препаративного выделения мангиферина из сырьевой фитомассы *H. alpinum*. Основная задача заключалась в необходимости выяснения влияния концентрации этилового спирта в экстрагенте на выход и качество мангиферина в условиях МАЭ без применения стадии кислотного гидролиза О-гликозидов в водном остатке после концентрирования спиртового экстракта из сырья. В данной работе приводятся результаты изучения процесса экстракции мангиферина в интервале концентрации этилового спирта в экстрагенте от 0 до 95 %. По данным литературы [12], мангиферин из фитомассы *H. alpinum* наиболее полно экстрагируется этанолом с концентрацией 70 % при нагреве до 80 °С, при гидромодуле 100 за 60 мин одной стадии экстракции. Приведенный исследователями вариант экстракции целевого продукта энерго- и материалозатратный. Альтернативой является способ экстракции мангиферина водно-спиртовыми экстрагентами под воздействием микроволнового излучения. Нами установлено в данной работе, что практически исчерпывающее извлечение мангиферина из фитомассы *H. alpinum* этанолом с концентрацией 20, 30 и 80 % может быть достигнуто за 9 мин трехкратной экстракции с микроволновой активацией процесса. При этом гидромодуль процесса можно уменьшить до восьми. В этом случае основные трудозатраты переносятся со стадии экстракции на стадии концентрирования спиртового экстракта, его очистки от сопутствующих веществ хлороформом и бутанолом, а также кристаллизации продукта в среде 60 % этанола. Основное время в процессе получения мангиферина из фитомассы растения затрачивается на стадию кристаллизации из 60 % спирта при отрицательных температурах (-10 °С) –

от 2 до 5 суток. В таблице приведены аналитические данные, отражающие влияние концентрации этилового спирта (в интервале 0 – 95 %) в экстрагенте на выход мангиферина и его содержание в конечном продукте. Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что оптимальным составом экстрагента, необходимого для успешного извлечения мангиферина в условиях МАЭ из сырьевой фитомассы *H. Alpinum*, является водный раствор этилового спирта с объемной долей, равной 20-30 или 80 %. Выход целевого продукта с применением экстрагента указанного состава из растительного сырья достигает 1,86 – 2,0 % при содержании мангиферина в исходном растительном сырье $2,0 \pm 0,2$ %. Массовая доля мангиферина в очищенных образцах продукта в этом случае составляет 97,2 – 97,9 %. Полученные результаты выделения мангиферина согласуются с литературными данными [3]. Так, максимальный выход мангиферина из фитомассы *Curcuma amada* в условиях микроволновой активации процесса наблюдался при концентрации этилового спирта в экстрагенте, равной 80 %.

При низком содержании этилового спирта в экстрагенте (40 – 60 %) выход мангиферина из фитомассы *H. alpinum* в выбранных условиях экстракции существенно ниже и составляет 0,94 – 1,73 %. Второй максимум выхода мангиферина наблюдается при концентрации этанола в экстрагенте 10 – 30 % (2,0 – 1,86 %). Но при концентрации этанола 10 % происходило сильное загрязнение продукта сопутствующими экстрактивными веществами растения и массовая доля мангиферина, при прочих равных условиях экстракции, в данном случае не превышала 92,6 %. Экстрагенты с высокой объемной долей этилового спирта (90 и 95 %) также не обеспечивают высокий выход целевого вещества из фитомассы растения. В основном, вероятно, это связано с плохой

набухаемостью травяной муки из фитомассы *H. alpinum* в экстрагентах с относительно высоким содержанием этилового спирта (степень набухания меньше 84 %) и, следовательно, затруднением процессов массопереноса в системе капиллярно-пористое тело – экстрагент даже в условиях МАЭ. При объемной доле этилового спирта 90 % из растительного сырья *H. alpinum* удается извлечь 1,15 % мангиферина. Кроме того, в этом случае конечный продукт даже после двукратной перекристаллизации содержит примеси, преимущественно фенольной природы, судя по цветной реакции с раствором треххлористого железа. Массовая доля мангиферина в конечном продукте в этих экспериментах не превышала 94,3 %. Масс-спектр мангиферина (образец № 8 в таблице) приведен на рис. 2. Хроматограмма, полученная методом ОФ-ВЭЖХ, приведена на рис. 1. Как следует из рисунка, в представленном для анализа образце мангиферин является доминирующим компонентом с массовой долей не менее 97 %. Помимо мангиферина в продукте присутствуют, как минимум, два минорных компонента неустановленной структуры.

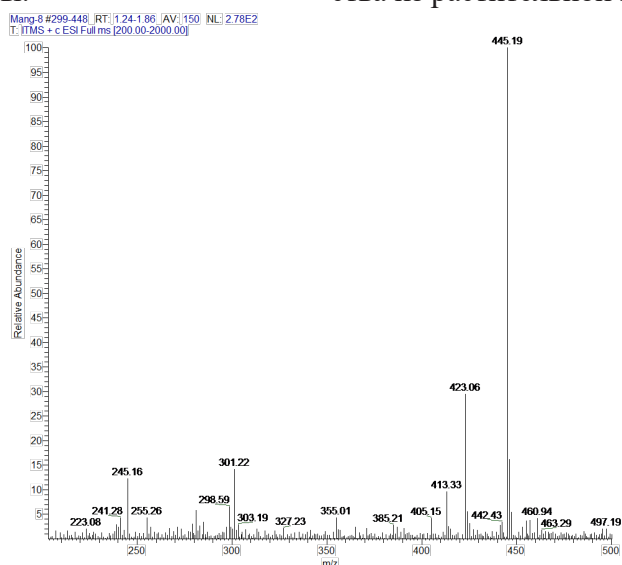


Рис. 2. Масс-спектр мангиферина, образец №8 (в табл.). По вертикали – относительная амплитуда сигнала, %, по горизонтали – отношение массы дочерних ионов к заряду (m/z). Сигнал от молекулярного иона мононатриевой соли мангиферина проявляется при соотношении m/z , равном 445.19.

На рис. 3 приведен УФ-спектр поглощения раствора мангиферина в водном спирте: в УФ – спектре поглощения мангиферина имеется три максимума при длинах волн 258,5, 316,5 и 367 нм, практически совпадающих с максимумами поглощения чистого мангиферина.

Следует отметить, что оптимум концентрации этанола в экстрагенте при извлечении мангиферина может сильно различаться и зависит от вида используемого растительного сырья. Например, в работе исследователей из Китая [3] мангиферин экстрагируют из листьев *Mangifera indica* лучше всего при гидромодуле 30 и в этаноле 45 % при мощности СВЧ излучения 474 Вт и продолжительности СВЧ экстракции 123 секунды с выходом целевого продукта 36.1 ± 0.7 мг/г. Нами было установлено, что экстрагенты с низким содержанием этилового спирта (10 – 30 %) также проявляют высокую эффективность экстракции мангиферина из фитомассы *H. alpinum* в условиях микроволновой активации процесса (см. таблица). В этих условиях при гидромодуле процесса, равном восьми, удается достичь практически исчерпывающего извлечения целевого вещества из растительной матрицы в раствор.

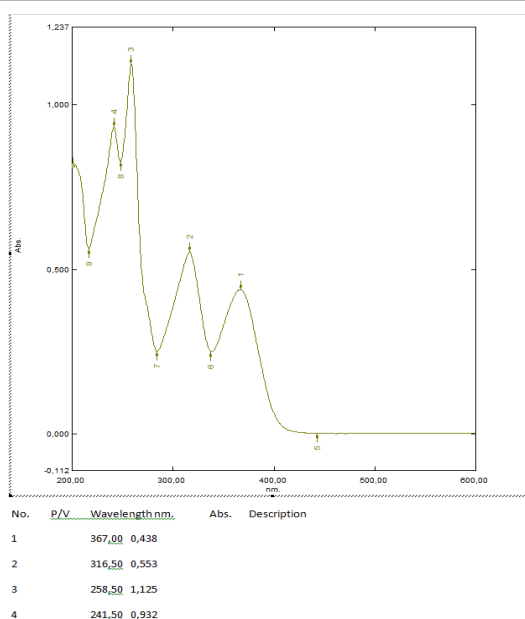


Рис. 3. Спектр поглощения раствора мангиферина (образец № 8) с концентрацией 10 мкг/мл в 60% этаноле в УФ- и видимой области спектра. Максимумы поглощения света: 1-367 нм, 2-316,5 нм, 3-258,5 нм, 4-241,5 нм. Спектрофотометр UV-Vis 1700 Shimadzu (Япония).

Таблица 1.

Влияние концентрации этанола на выход мангиферина в условиях микроволновой активации процесса экстракции (тройная повторность выполнения экспериментов по экстракции)

№	Этанол, % (v/v)	Выход, % масс.	Содержание, % масс.	СКО, % по содержанию	СКО, % по выходу	Степень набухания* сырья, %	СКО, % по степени набухания, %
1	0	1,24	84,4	0,08	0,1	169	13
2	10	2,00	92,6	0,06	0,08	110	11
3	20	1,99	97,8	0,02	0,1	140	12
4	30	1,86	97,2	0,02	0,13	155	13
5	40	1,73	95,4	0,04	0,15	139	12
6	50	0,95	95,2	0,03	0,14	133	11
7	60	0,94	95,1	0,06	0,08	132	12
8	70	1,70	96,4	0,05	0,12	131,6	12
9	80	1,87	97,9	0,4	0,1	131	12
10	90	1,15	94,3	0,2	0,2	83	9
11	95	1,22	90,6	0,8	0,16	81	9

*Степень набухания сырья рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{(m - m_0) * 100\%}{m_0}$$

где m – масса набухшего сырья, г; m₀ – масса сухого сырья, г.

С целью достоверной идентификации структуры мангиферина образец вещества исследовали методами 1H и 13C ЯМР анализа. Спектры ЯМР характеризуются следующими сигналами: 1H-ЯМР (300 МГц, ДМСО): 6,38 (1H, с, Н-4),

6,85 (1Н, с, Н-5), 7,37 (1Н, с, Н-8), 4,06 (1Н, д, Н-10, J=60Гц); 13С-ЯМР (300 МГц, ДМСО): 162,2 (С-1), 108,3 (С-2), 164,15 (С-3), 93,7 (С-4), 102,9 (С-5), 154,9 (С-6), 144,2 (С-7), 108,3 (С-8), 179,5 (С-9), 156,7 (С-4а), 151,4 (С-4б), 111,9 (С-8а), 101,7 (С-8б); 2-Glc: 81,8 (С-1'), 73,5 (С-2'), 71,0(С-3'), 70,7 (С-4'), 79,3 (С-5'), 61,9 (С-6'). Что соответствует данным, приведенным в авторском свидетельстве № 050395 (СССР) «Способ получения мангиферина» [21].

Заключение

Многолетними интродукционными исследованиями установлена высокая перспективность выращивания *Hedysarum alpinum* в почвенно-климатических условиях подзоны средней тайги Республики

Коми с целью получения качественного лекарственного сырья с высоким содержанием мангиферина. Установлено, что мангиферин из сырьевой фитомассы интродуцируемых растений эффективно экстрагируется при микроволновой активации процесса за короткий период времени воздействия микроволнового излучения на суспензию сырья в водном растворе этилового спирта. Максимальный выход мангиферина достигается в условиях микроволновой активации экстракции этиловым спиртом с объемной долей спирта 10 – 30% и 80 %. Найдено, что условия МАЕ обеспечивают высокий выход целевого вещества (1,86 – 2,0 %) из растительной матрицы (при содержании в сырье 2,0±0,2 %) в раствор за суммарный период экстракции 9 мин.

Библиографический список

1. Jatoi S.A, Kikuchi A, Gilani S.A, Watanabe K.N. Phytochemical, pharmacological and ethnobotanical studies in mango ginger (*Curcuma amada* Roxb.; Zingiberaceae) // *Phytotherapy Research*.- 2007.- Vol. 21. - P. 507–516. <https://doi.org/10.1002/ptr.2137>.
2. Yoshimia N., Matsunaga K., Katayama M., Yamada Y., Kuno T., Qiao Z., Hara A., Yamahara J., Moria, H. The inhibitory effects of mangiferin, a naturally occurring glucosylxanthone, in bowel carcinogenesis of male F344 rats // *Cancer Letters*.- 2001.- Vol. 163.- P. 163–170. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(00\)00678-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(00)00678-9).
3. Zou T.B., Wu H.F., Li H.W., Jia Q., Song G. Comparison of microwave-assisted and conventional extraction of mangiferin from mango (*Mangifera indica* L.) leaves // *Separation Science*.- 2013.- Vol. 36.- P. 3457–3462. <https://doi.org/10.1002/jssc.201300518>.
4. Kull, J., Dutta A., Constales D. Experimental and modeling studies on microwave-assisted extraction of mangiferin from *Curcuma amada* // *3 Biotech*. - 2014.- Vol. 4.- P. 107–120. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0125-5>.
5. Кукушкина Т.А., Зиннер Н.С., Высочина Г.И., Свиридова Т.П. Содержание ксантонов в надземной части растений *Hedysarum theinum* Krasnov и *H. alpinum*. (Fabaceae) при выращивании в Сибирском ботаническом саду (Томск) // *Химия растительного сырья*.- 2011. - №3. - С. 113–116.
6. Савченко О.М., Цыбулько Н.С., Ромашина С.И. Сравнительная оценка морфотипов копеечника альпийского // *Вестник КрасГАУ*.- 2023.- №6.- С. 12–17. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-6-12-17>.
7. Ловкова М.Я., Рабинович А.М., Пономарева С.М., Бузук Г.Н., Соколова С.М. Почему растения лечат. М., 1989.- 255 с.
8. Авт. свид. № 596242 СССР, МПК А61 К 35/78. Способ получения мангиферина № 2317223/28-13: заяв. 23.01.1976. опул. 05.03.1978 / Русакова С.В., Глызин В.И., Кочерга С.И., Солдатова О.В., Мулевич В.М.: заявитель ВИЛАР, опубл. БИ № 9. - 2 с.
9. Пунегов В.В., Фомина М.Г., Чуча К.К. Содержание мангиферина в сырьевой фитомассе и органах растения *Hedysarum alpinum* L. в культуре в средней подзоне тайги Республики Коми // *Вестник Института Биологии Коми НЦ УрО РАН*. - 2015. - №6 (194). - С.13–16.
10. Портнягина, Н.В., Фомина, М.Г., Пунегов, В.В., Зайнуллина, К.С., Эчишвили, Э.Э. Итоги интродукции *Hedysarum alpinum* L. в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми // *Известия Самарского НЦ РАН*. - 2014.- Т.16. - №1(3). - С. 796–799.

11. Красная книга Республики Коми / под общ. ред. С.В. Дегтевой. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография».-2019. - 498 с.
12. Коцур Е.В., Куляк О.Ю., Радимич А.И., Ромашкина С.И., Сайбель О.Л. Подбор условий экстрагирования мангиферина из травы копеечника альпийского (*Hedysarum alpinum* L.) // Современные тенденции развития технологий здоровьесбережения: матер. XI Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. М., 2023. - С. 248–252.
13. Имачуева Д.Р., Серебряная Ф.К., Зилфикаров И.Н. Количественное определение мангиферина в траве *Hedysarum saucasicum* M. Vieb. методом высокоэффективной жидкостной хроматографии // Фармация. - 2022.- Вып. 71 (2). - С. 27–32. <https://doi.org/10/29296/25419218-2022-02-05>.
14. App Li Y.-J., Bi K.-S. RP-HPLC Determination and Pharmacokinetic Study of Mangiferin in Rat Plasma After Taking Traditional Chinese Medicinal-Preparation: Zhimu Decoction // Chromatographia. - 2003.- Vol. 57 (11-12). - P.767–770. <https://doi.org/10.1007/BF02491763>.
15. Talamond P., Mondolot L., Gargadennec A., Kochiko A., Hamon S., Fruchier A., Campa C. US Patent No 2011/0046077 February 2011
16. Зиннер Н.С., Высочина Г.И., Кукушкина Т.А., Свиридова Т.П. Биологически активные вещества *Hedysarum alpinum* L. и *H. theinum* Krasnob. (Fabaceae), интродуцируемых в Томскую область // Вестник Томского государственного университета. Серия Биология. - 2010. - №4 (12). - С. 116–122.
17. Высочина Г.И., Кукушкина Т.А. Биологически активные вещества некоторых видов рода *Hedysarum* L. // Химия растительного сырья. - 2011. - №4. - С. 251–258.
18. Khan A.B., Bhuvaneshwari J., Arif M. Microwave Supported Extraction and Optimization of Flavonoid Mangiferin from *Mangifera indica* L. Stem Bark using Orthogonal Array Design // Research Journal of Pharmacy and Technology. - 2023.- Vol. 16(3). - P. 1113–1117. - <https://doi.org/10/52711/0974-360X.2023.00185>.
19. Padmapriya K., Dutta A., Chaudhuri S., Dutta D. Microwave assisted extraction of mangiferin from *Curcuma amada* // Biotech. - 2012. - Vol. 2.- P. 27–30. <https://doi.org/10/1007/s13205-011-0023>.
20. Salomon S., Sevilla I., Betancourt R., Romero A., Nuevas-Paz L., Acosta-Esquivarosa J. Extraction of mangiferin from *Mangifera indica* L. leaves using microwave assisted technique // Emirates Journal of Food and Agriculture. - 2014.- Vol. 26 (7). - P. 616–622. <https://doi.org/10/9755/ejfa.v26i7.18188>.
21. Силла А., Глызин В.И. Авт. свид. СССР № 050395 от 22.08.1980.

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF EXHAUSTIVE EXTRACTION OF MANGIFERIN FROM THE ABOVE-GROUND PART OF THE INTRODUCENT PLANT *HEDYSARUM ALPINUM* L. UNDER CONDITIONS OF MICROWAVE ACTIVATION OF THE PROCESS

Punegov V.V.¹, Patov S.A.², Skrotskaya O.V.¹

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Center, UB RAS*

²*Institute of Chemistry, Komi Scientific Center, UB RAS*

For citation:

Punegov V.V., Patov S.A., Skrotskaya O.V. Evaluation of the possibility of exhaustive extraction of mangiferin from the above-ground part of the introduced plant *Hedysarum alpinum* L. under conditions of microwave activation of the process // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 6–16. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.1>

The dependence of the yield and purity of mangiferin from the phytomass of the alpine sweetvetch *Hedysarum alpinum* L. (Fabaceae) introduced in the Botanical Garden of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center on the concentration of alcohol in the extractant under conditions of microwave activation of the extraction process has been studied. It has been established

that the maximum yield of mangiferin – 1.87-2.0%, is achieved at an alcohol concentration in the extractant of 10-30% or 80%, a radiation power of 800 W in the microwave chamber volume, a total duration of the extraction stages of 9 minutes and a process hydromodule equal to eight.

Keywords: extraction, microwave radiation, mangiferin, HPLC-MS and UV, NMR spectrometry, product yield, Hedysarum alpinum, medicinal plant, introduction.

Сведения об авторах

Пунегов Василий Витальевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела Ботанический сад, Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: punegov@ib.komisc.ru

Патов Сергей Александрович, кандидат химических наук, научный сотрудник Лаборатории физико-химических методов исследования, Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 28; e-mail: ser-patov@yandex.ru

Скромная Ольга Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент, зав. отделом Ботанический сад, Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; e-mail: skrockaja@ib.komisc.ru

Материал поступил в редакцию 02.10.2025

СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ВНУТРИСУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ
(НА ПРИМЕРЕ КАМСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА)*

Т.Н. Синцова, *Горный институт УрО РАН*

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

О.М. Розенталь, *Институт водных проблем РАН*

Л.Ю. Левин, *Горный институт УрО РАН*

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

Для цитирования:

Синцова Т.Н., Лепихин А.П., Розенталь О.М., Левин Л.Ю., Богомолов А.В. Статистические аспекты внутрисуточных колебаний показателей качества воды (на примере Камского водохранилища) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – №4. – С. 17–35. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.2>

Водные объекты, расположенные в зонах активного техногенеза, характеризуются существенной временной изменчивостью гидрохимических показателей качества воды. При проведении традиционного мониторинга водных объектов с отбором проб воды стандартными батометрами определяются значения контролируемых показателей качества воды, как правило, с характерным временным усреднением ~ 10 секунд. Возникает проблема, как данные показатели соотносятся с их среднесуточными значениями. Каков должен быть минимальный период усреднения, для того чтобы получать объективные среднесуточные значения рассматриваемых показателей качества воды? В работе для решения данной задачи рассмотрено применение дисперсионного анализа ежесекундных и 5-минутных наблюдений электропроводности и мутности воды для двух участков Камского водохранилища: в районе Чусовского плеса г. Перми и в районе г. Березники. Показано, что необходимо проводить контроль качества воды на основе оценки не «мгновенных», а интегральных методов отбора проб с временным масштабом усреднения не менее 10 минут для Камского водохранилища в районе г. Перми. В то же время для Камского водохранилища в районе г. Березники подтверждается необходимость проведения отбора проб интегральным методом с усреднением не менее 1.5 минут.

* Сбор полевых материалов и первичная их статистическая обработка выполнены при финансовой поддержке РФ в рамках проекта № 19-77-30008П; дисперсионный анализ материалов выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Горного института УрО РАН «Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования» (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6), также в рамках темы № FMWZ-2025-0002 государственного задания ИВП РАН (номер государственной регистрации 125030703344-8).

Ключевые слова: дисперсионный анализ, среднее арифметическое, дисперсия, Камское водохранилище.

Введение

В настоящее время в связи с внедрением современных методов измерения, кроме межгодовой и сезонной динамики показателей качества воды в водных объектах, расположенных в зонах активного техногенеза, принципиально важное значение приобретают внутрисуточные короткопериодные колебания, формирующиеся не только в результате внешних факторов, но и внутриводоемных процессов, связанных с их разбавлением, миграцией и трансформацией. Поэтому в работе выполнены анализ и оценка внутрисуточной изменчивости показателей качества воды для решения такой актуальной практической задачи, как оценка объективности результатов мониторинга, построенного на «мгновенном», разовом контроле качества.

При этом возникает естественный вопрос: как корректно оценивать результаты измерений, если пробы воды отбираются каждый день с частотой 1/с и в результате наблюдается их существенная изменчивость, какая должна быть технология отбора, для того чтобы при минимуме затрат получить корректные оценки? Для того, чтобы ответить на данный вопрос, в работе был проведен дисперсионный анализ с целью выявления устойчивого периода колебаний показателей качества воды, не имеющих значимых статистических различий с учетом их внутрисуточной изменчивости, на примере Камского водохранилища.

Весь спектр контролируемых показателей невозможно определить с частотой, соответствующей колебаниям показателей качества воды. Такой контроль возможен только при использовании автоматических систем, оснащенных физическими методами измерения.

В настоящее время рассматриваемые технологии отработаны для оценки удельной электропроводности и мутности воды. В то же время многочисленные исследования [1-3] показывают, что эти показатели статистически достаточно хорошо связаны с большинством лимитирующих показателей качества воды. Поэтому выводы, получаемые для этих двух показателей, могут быть перенесены и на показатели качества воды, определяемые химическим методом.

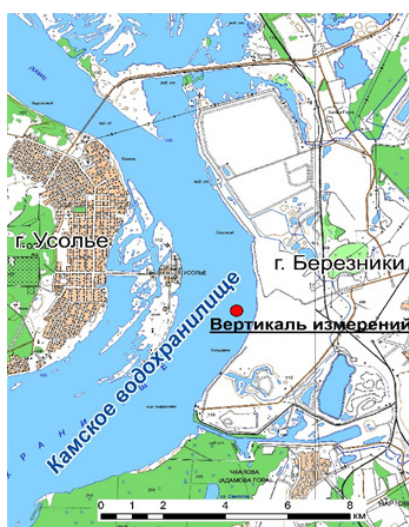
Задачей проведения мониторинга водных объектов является оценка их состояния для возможной реализации определенных видов водопользования. При этом в качестве лимитирующих показателей в первую очередь выступают химические и физические показатели качества воды, колебания которых характеризуются не только пространственной, но и временной неоднородностью. Поэтому планирование мониторинга должно проводиться с учетом рассматриваемых параметров.

В работе на основе дисперсионного анализа показано, что использовать данные ежесекундных натуральных наблюдений электропроводности и мутности воды необходимо с усреднением минимум в 10 минут в районе Чусовского плеса г. Перми и в 1.5 минуты в районе г. Березники, а данные 5-минутных – с усреднением в 2.5 часа в районе г. Березники. Этого можно достичь применением интегрального метода отбора проб. При этом необходимо подчеркнуть, что масштабы временного усреднения могут существенно варьировать в зависимости от особенностей гидродинамики исследуемых водных объектов.

Материалы и методы

В работе использовались материалы полевых натуральных наблюдений ежесекундных колебаний значений электро-

проводности и мутности воды на Камском водохранилище в районе Чусовского плеса г. Перми и ежесекундных и 5-минутных колебаний – в районе г. Березники с использованием MIDAS ECM [13] в 2021 и 2022 гг. в течение 1 суток (рис. 1а, б). На Камском водохранилище наблюдается значительная внутригодовая динамика изменения уровней воды, которые в отдельные годы превышают 7 метров.



а



б

Рис. 1. Карта – схема Камского водохранилища в районе г. Березники (а) и Чусовского плеса г. Перми (б)

Первый исследуемый участок – участок Камского водохранилища в районе г. Березники, находящийся в зоне переменного подпора от Камской ГЭС. Зона выклинивания подпора здесь при сработке водохранилища перемещается вниз по течению, как правило, это наблюдается в период предвесенней сработки уровня, в этот период для данного участка характерны речные условия. В районе г. Березники период естественного режима уровня составляет от 1 до 3.5 месяца. При уровнях, близких к НПУ (нормальный подпорный уровень), подпор распространяется до района пгт. Тюлькино – п. Керчевский. Характерной особенностью данного участка водохранилища (рис. 1а) является очень высокая техногенная нагрузка, связанная как с точечными, так и с диффузными источниками загрязнения. Для этой зоны характерны фильтрационные разгрузки подземных высокоминерализованных вод как естественного, так и техногенного генезиса.

Второй исследуемый участок – Чусовской плес Камского водохранилища, находящийся в зоне постоянного подпора от плотины Камской ГЭС (рис. 1б). Чусовской плес образован слиянием рек Сылвы и Чусовой. Как показали ранее выполненные исследования [1-3, 14], в зимний период данный участок Камского водохранилища характеризуется значительной вертикальной стратификацией водных масс, связанной с тем, что в зимний период реки переходят на подземный режим питания и более минерализованные, более плотные воды р. Сылвы подтекают под менее плотные, имеющие меньшую жесткость воды реки Чусовой, создавая тем самым слой плотностного скачка. В зимний период в условиях достаточно однородного распределения температуры воды, как по глубине, так и по акватории водного объекта, определяющим фактором устойчивой стратификации является минерали-

зация воды. Однако общая минерализация воды, являясь химическим показателем, требует для своего определения достаточно сложной процедуры. Вследствие этого при проведении полевых исследований значительно более удобно использовать непосредственно измеряемый показатель – удельную электропроводность воды. Поэтому измерения были выполнены с использованием этого показателя на основе многопараметрического измерителя Midas ЕСМ. Основными преимуществами применения этого показателя являются его очень хорошая линейная связь с минерализацией (коэффициент корреляции Пирсона = 0,96) и минимальные возмущения в водную массу при проведении его измерений, соответственно, небольшие значения метрологической погрешности.

В результате выполненных полевых наблюдений выявлено, что на участке

Камского водохранилища в районе основного питьевого водозабора г. Перми – Чусовских очистных сооружений (ЧОС) – наблюдаются волнообразные ежесекундные колебания мутности и электропроводности с амплитудой, достигающей в ряде случаев приблизительно 50% измеряемой величины (рис. 2).

Как видно из рисунка 3, в районе г. Березники амплитуда ежесекундных колебаний мутности воды не превышает 30%, более существенны резкие изменения значений удельной электропроводности, превышающие 100%.

При этом амплитуда 5-минутных колебаний удельной электропроводности не превышает 10%, более значимые колебания характерны для мутности, однако и они составляют около 20%, что существенно меньше при наличии плотностной стратификации (рис. 4).

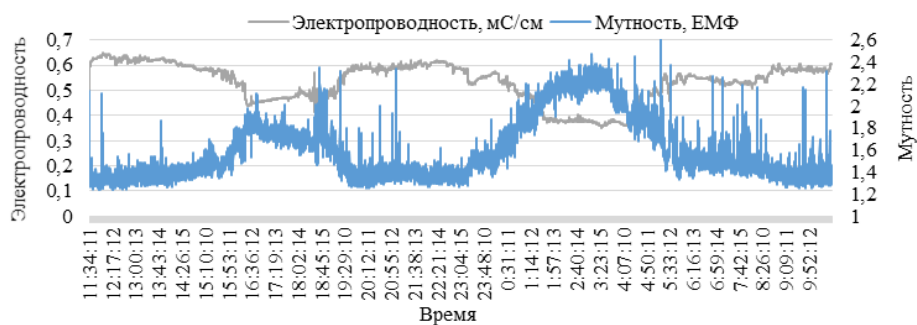


Рис. 2. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми при $v=1/c$ (28-29.01.21)

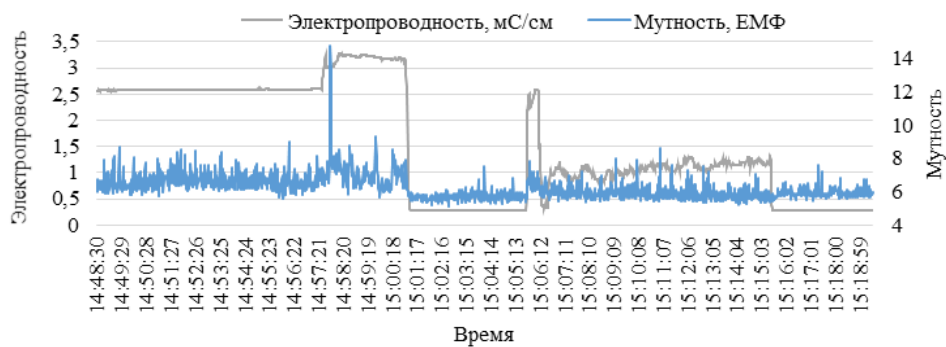


Рис. 3. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники при $v=1/c$ (14.10.22)

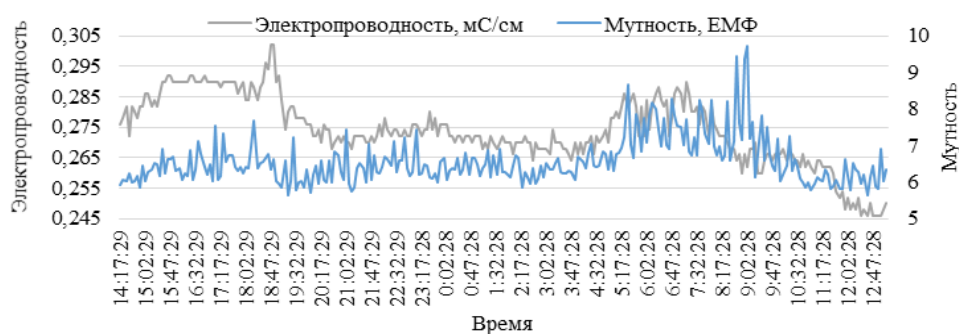


Рис. 4. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники при $v=12$ /час (13-14.09.25) (б)

Для оценки внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды для Камского водохранилища была использована определенная методика обработки трех первичных рядов по мутности и трех по электропроводности (рис. 2-4) для образования выборок разовых значений и выборок усредненных значений по подгруппам с помощью дисперсионного анализа (ANOVA):

1. Были взяты первичные ряды ежедневных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе ЧОС г. Перми (рис. 2) при объеме выборки $N=8279$ за период наблюдений 11:34:11 28.01 – 10:33:15 29.01.2021 г. Для этого каждый первичный ряд наблюдений $C_{перв}$ был разделен на три подгруппы по 10, 60 и 600 значений (уровни времени продолжительности). Каждая группа была образована по двум вариантам группирования (характер выборки) в первичном ряду наблюдений: усредненный ряд – усреднением по 10, 60 и 600 значений ($C_{уср 10}$, $C_{уср 60}$, $C_{уср 600}$); выборочный ряд – выборочно взято каждое 10, 60 и 600 значения ($C_{выб 10}$, $C_{выб 60}$, $C_{выб 600}$).

2. На основе первичных рядов ежедневных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе г. Березники (рис. 3) при $N=1861$ за 14:48:30 – 15:19:30 14.10.2022 г. проводился анализ для трех независимых групп в двух вариантах группировки (выборочный, усред-

ненный ряды): усредненный ряд по 30, 60 и 90 значений ($C_{уср 30}$, $C_{уср 60}$, $C_{уср 90}$); выборочный ряд – 30, 60, 90 значения ($C_{выб 30}$, $C_{выб 60}$, $C_{выб 90}$).

3. Выполнен анализ на основе первичных рядов 5-минутных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе г. Березники (рис. 4) при $N=276$ за 14:17:29 13.09 – 13:12:28 14.09.2021 г. для трех независимых групп (по 3, 10 и 30 значений) в двух вариантах группировки (выборочный, усредненный ряды): усредненный ряд по 3, 10 и 30 значений ($C_{уср 3}$, $C_{уср 10}$, $C_{уср 30}$); выборочный ряд – 3, 10, 30 значения ($C_{выб 3}$, $C_{выб 10}$, $C_{выб 30}$).

Перед применением дисперсионного анализа выборки проверяются на нормальность распределения с помощью критериев Колмогорова, Шапиро-Уилка. При выполнении условия нормальности применяется дисперсионный анализ, где для вычисления статистики критерия Фишера F необходимо рассчитать средний квадрат отклонений между группами (межгрупповую дисперсию) и средний квадрат отклонений внутри групп (внутригрупповую дисперсию) между выборками. Необходимо определить, есть ли различия между взятыми выборками в исследуемых группах. Нулевой гипотезой служит гипотеза об отсутствии различий между средними значениями мутности и электропроводности воды в воде Камского водохранилища в исследуемых

группах. Если условие нормальности не выполняется, то применяем непараметрический критерий Краскела-Уоллиса для сравнения медианы групп.

Результаты и обсуждение

Качество воды в поверхностных водных объектах определяется очень широким комплексом факторов, поэтому они характеризуются большим диапазоном изменения. При этом значимо выделяются как внутригодовые колебания, связанные с сезонностью гидрологических и гидрохимических процессов, так и достаточно кратковременные, обусловленные турбулентными и когерентными колебаниями водных масс. Для основных видов водопользования характерна определенная инерционность в восприятии качества воды.

В то же время для сопоставимости последовательных измерений необходим учет и «нивелирование» быстрых колебаний. Для этого следует рассматривать и сопоставлять временной масштаб результатов анализа проб воды, отобранных интегральным способом T_{Cummi} , с характерным временем усреднения T_{Ci} , принципиально важно, чтобы $\Delta T_{Cummi} \gg \Delta T_{Ci}$. К сожалению, традиционные методы отбора проб воды с использованием стандартных батометров и пробоотборников не обеспечивают такую возможность [4-12].

Если долгопериодные колебания могут быть нивелированы путем увеличения частоты отбора проб, то основным инструментом нивелирования короткопериодных колебаний является использование интегрального отбора проб воды с характерным временем забора воды $\Delta T_{забCi} \gg \Delta T_{Ci}$. Характерными временными масштабами для планирования и реализации мониторинга поверхностных водных объектов являются:

– время статистически значимого изменения содержания i -показателя (C_i) вследствие долгопериодных колебаний (сезонных колебаний)

$$T_{cCi} = \left(\frac{1}{C_i} \left(\frac{\partial C_i}{\partial T} \right) \right)^{-1};$$

– временной масштаб изменения i -показателя качества воды, обусловленный турбулентными пульсациями $T_{турpCi}$;

– временной масштаб забора пробы воды традиционным методом T_{mpCi} ;

– временной масштаб усреднения для j -вида водопользования $T_{ВПj}$;

– временной масштаб изменения факторов, определяющих колебания химических, физических показателей качества воды поверхностных водных объектов $T_{фCi}$.

Для оценки эффективности действующей системы мониторинга водных объектов введем и проанализируем параметры, определяющие особенности формирования внутрисуточных колебаний показателей качества воды:

– среднеквадратическое отклонение измерения (метрологическая ошибка) $\sigma_{из i}$;

– среднеквадратическая изменчивость, обусловленная краткосрочными колебаниями $\sigma_{воз i}$;

– долгопериодная изменчивость i -ингредиента ΔC_{ii} , где $\Delta C_{i\Delta t_{1,2}} = |C_{t_2} - C_{t_1}|$;

– характерное время короткопериодных колебаний $\tau_{кп i}$;

– характерная продолжительность единичного отбора проб воды на i -показатель $\tau_{заб i}$;

– характерный период между смежными отборами проб воды на i -показатель $\tau_{пер i}$.

Если $\sigma_{из i} \gg \sigma_{воз i}$, $\sigma_{из i} \ll \Delta C_{ii,2}$, то роль короткопериодных внутрисуточных колебаний показателей качества воды мала и основной интерес представляют долговременные сезонные колебания. Соответственно, величина $\tau_{заб}$ практически не

играет никакой роли, и она не учитывается при планировании мониторинга, при этом необходимо, чтобы

$$\tau_{\text{непр}} \leq \left| \frac{1}{C_i} \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|^{-1}.$$

Ситуация принципиально меняется, если $\sigma_{\text{из}}^2 \leq \sigma_{\text{воз}}^2$. В этом случае для получения корректных оценок характерных значений показателей качества воды необходимо, чтобы $\tau_{\text{заб } i} \gg \tau_{\text{к } i}$. При этом благодаря центральной предельной теореме (далее – ЦПТ) можно получить объективные оценки качества воды, так как при отборе

проб воды $\tau_{\text{заб } i} < 20$ с, соответственно, $\tau_{\text{к } i} > \tau_{\text{заб } i}$, возникают серьезные проблемы с идентификацией получения оценок состояния водных объектов.

Результаты статистической обработки выборок мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми с частотой измерения $\nu=1/\text{с}$ показали, что значения коэффициентов вариации колебаний мутности воды весьма небольшие: $C\nu \approx 0.144 - 0.174$, так и электропроводности: $C\nu \approx 0.142 - 0.158$ (табл. 1).

Таблица 1.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Мутность, ЕМФ ($\nu=1/\text{с}$)									
<i>Сперв</i>	8279	1.602	1.488	1.238	3.000	0.279	0.174	1.045	0.070
<i>Свыб 10</i>	828	1.606	1.488	1.250	2.338	0.273	0.170	1.012	-0.086
<i>Свыб 60</i>	138	1.598	1.482	1.288	2.263	0.270	0.169	0.939	-0.247
<i>Свыб 600</i>	14	1.632	1.526	1.375	2.188	0.235	0.144	1.037	0.625
<i>Суср 10</i>	828	1.602	1.492	1.292	2.314	0.269	0.168	1.091	0.046
<i>Суср 60</i>	138	1.602	1.503	1.323	2.271	0.267	0.166	1.114	0.128
<i>Суср 600</i>	14	1.599	1.540	1.358	2.181	0.260	0.163	1.274	0.840
Электропроводность, мСм/см ($\nu=1/\text{с}$)									
<i>Сперв</i>	8279	0.530	0.552	0.352	0.648	0.079	0.150	-0.780	-0.521
<i>Свыб 10</i>	828	0.530	0.552	0.356	0.642	0.079	0.149	-0.783	-0.506
<i>Свыб 60</i>	138	0.529	0.553	0.360	0.642	0.080	0.150	-0.784	-0.498
<i>Свыб 600</i>	14	0.520	0.545	0.364	0.622	0.082	0.158	-0.776	-0.463
<i>Суср 10</i>	828	0.530	0.552	0.357	0.643	0.079	0.149	-0.779	-0.523
<i>Суср 60</i>	138	0.530	0.550	0.361	0.639	0.079	0.149	-0.789	-0.497
<i>Суср 600</i>	14	0.531	0.546	0.373	0.625	0.075	0.142	-0.804	-0.106

Для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=1/\text{с}$ установлено, что значения коэффициентов вариации $C\nu$ колебаний мутности воды незначительные (0.078-0.113), в отличие от электропроводности: $C\nu \approx 0.7$ (табл. 2).

Результаты статистической обработки выборок мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в ра-

йоне г. Березники с частотой измерения $\nu=12/\text{час}$ показали, что значения коэффициентов вариации колебаний мутности воды тоже небольшие для всех выборок: $C\nu \approx 0.066-0.096$, как и для электропроводности: $C\nu \approx 0.04-0.047$ (табл. 3).

Характерной особенностью ежесекундных колебаний электропроводности для Камского водохранилища в районе г. Берез-

Таблица 2.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=1/\text{час}$

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Электропроводность, мСм/см ($\nu=1/\text{с}$)									
С _{перв}	1861	1.532	1.148	0.270	3.272	1.074	0.701	0.182	-1.560
С _{выб 30}	63	1.509	1.110	0.270	3.242	1.091	0.723	0.189	-1.621
С _{выб 60}	32	1.476	1.108	0.270	3.242	1.121	0.760	0.251	-1.670
С _{выб 90}	21	1.527	1.110	0.270	3.212	1.130	0.740	0.161	-1.773
С _{уср 30}	63	1.512	1.146	0.271	3.235	1.063	0.703	0.214	-1.543
С _{уср 60}	32	1.493	1.168	0.272	3.231	1.052	0.704	0.262	-1.480
С _{уср 90}	21	1.512	1.129	0.272	3.200	1.042	0.689	0.307	-1.480
Мутность, ЕМФ ($\nu=1/\text{с}$)									
С _{перв}	1861	6.249	6.063	5.150	14.725	0.708	0.113	2.862	21.347
С _{выб 30}	63	6.204	6.075	5.400	7.575	0.575	0.093	0.772	-0.312
С _{выб 60}	32	6.094	5.975	5.400	7.125	0.490	0.080	0.563	-0.618
С _{выб 90}	21	6.210	6.075	5.400	7.550	0.604	0.097	0.635	-0.650
С _{уср 30}	63	6.246	6.002	5.586	8.066	0.508	0.081	1.036	1.129
С _{уср 60}	32	6.242	6.000	5.648	7.723	0.490	0.078	1.049	0.907
С _{уср 90}	21	6.245	6.006	5.716	7.529	0.485	0.078	1.068	0.608

Таблица 3.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=12/\text{час}$

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Электропроводность, мСм/см ($\nu=12/\text{час}$)									
С _{перв}	276	0.274	0.272	0.246	0.302	0.011	0.040	-0.257	0.190
С _{выб 3}	92	0.274	0.272	0.246	0.302	0.011	0.041	-0.241	0.309
С _{выб 10}	28	0.273	0.272	0.246	0.292	0.011	0.042	-0.385	0.378
С _{выб 30}	10	0.273	0.274	0.246	0.292	0.012	0.045	-0.948	2.204
С _{уср 3}	92	0.274	0.273	0.246	0.298	0.011	0.040	-0.310	0.259
С _{уср 10}	28	0.274	0.273	0.247	0.291	0.011	0.041	-0.481	0.406
С _{уср 30}	10	0.272	0.272	0.247	0.290	0.013	0.047	-0.586	0.344
Мутность, ЕМФ ($\nu=12/\text{час}$)									
С _{перв}	276	6.569	6.413	5.638	9.713	0.631	0.096	1.791	4.737
С _{выб 3}	92	6.526	6.375	5.638	9.713	0.623	0.095	2.066	7.019
С _{выб 10}	28	6.574	6.444	5.638	7.825	0.558	0.085	0.906	0.262
С _{выб 30}	10	6.440	6.375	5.638	7.313	0.563	0.087	0.427	-0.875
С _{уср 3}	92	6.569	6.444	5.875	8.184	0.504	0.077	1.338	1.394
С _{уср 10}	28	6.564	6.447	6.013	7.812	0.464	0.071	1.434	1.376
С _{уср 30}	10	6.542	6.412	6.132	7.435	0.434	0.066	1.514	1.188

ники является ее положительная асимметрия ($As \approx 0.2 - 0.3$), а для г. Перми с $\nu=1/\text{с}$ и г. Березники с $\nu=12/\text{час}$ присуща существенная отрицательная асимметрия ($As_{\text{Пермь}} \approx -0.8$; $As_{\text{Березники}} \approx -0.2 - -0.9$), что естественно, такая ситуация с позиции обе-

спечения надежности выполнения регламентных нормативов весьма благоприятна.

Распределение ежесекундных колебаний мутности воды в районе г. Березники характеризуется положительной, но более высокой, статистически значимой

асимметрией ($As \sim 0.6 - 2.9$), в отличие от электропроводности, а в районах г. Перми с $v=1/c$ и г. Березники с $v=12/\text{час}$ – положительной асимметрией ($As_{\text{Пермь}} \approx 1.3$; $As_{\text{Березники}} \approx 0.4 - 2.1$). Безусловно, контролю содержания мутности должно уделяться повышенное внимание.

При проведении статистической обработки ежесекундных и 5-минутных колебаний показателей качества воды необходимо использовать не традиционные статистические критерии, которые в данном случае не работают, а применять более устойчивые к отклонениям от нормального распределения методы, такие как дисперсионный анализ. При этом в настоящее время дисперсионный анализ не так часто применяется для сравнения средних значений показателей качества воды поверхностных водных объектов, расположенных в зонах активного техногенеза, так как отсутствуют достаточно длительные ряды наблюдений.

Дисперсионный анализ считается более устойчивым, по сравнению с использованием множественных сравнений с помощью t -критерия, потому что риск ошибки первого рода для многократного применения t -критерия больше, чем указанный уровень значимости для каждого t -критерия по отдельности. Это приводит к несостоятельности статистических оценок и к получению ложнодостоверных результатов, то есть обнаружению статистически значимых различий там, где их на самом деле нет.

В данной статье в процессе дисперсионного анализа сопоставляются дисперсии исследуемого показателя: межгрупповая, обусловленная различием групп (средних значений), и внутригрупповая, вызванная случайными причинами. Чем больше частное, полученное в результате деления межгрупповой дисперсии на внутригрупповую дисперсию (F -критерий), тем больше различаются средние значения сравниваемых

выборок и тем выше статистическая значимость этого различия. При этом для применения дисперсионного анализа необходимо выполнение следующих условий:

1. Выборки должны быть статистически независимыми, т.е. их коэффициент корреляции = 0.

2. Колебания исследуемых показателей качества воды должны описываться нормальным распределением, а, соответственно, и дисперсии исследуемых показателей должны быть равны. Для проверки принципиальных статистических различий предлагается применять критерии нормальности Шапиро-Уилка и Колмогорова. Если эти условия не соблюдаются, то необходимо переходить на непараметрические критерии, например, критерий Краскала-Уоллиса.

Для выполнения дисперсионного анализа необходимо проверить, можно ли применять этот критерий.

Проверка условий нормальности распределения электропроводности и мутности воды на основе критериев Колмогорова и Шапиро-Уилка

Для проверки условий нормальности распределения электропроводности и мутности воды использовались статистические критерии Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро-Уилка [15], позволяющие принять или отвергнуть нулевую гипотезу о нормальном законе распределения. При этом выборки будут описываться нормальным законом распределения согласно ЦПТ только в том случае, если процессы определяются:

– воздействием большого количества факторов N ;

– динамикой каждого из определяющих факторов, которые статистически независимы, т.е. $R_{Ni, Nj} \equiv 0$;

– тем, что во множестве определяющих факторов отсутствуют доминирующие, т.е.

$$\frac{x_{\max i}}{N} \rightarrow 0$$

$$\sum_{i=1}^N x_i$$

где $x_{\max i}$ – воздействие самого значимого фактора.

Результаты тестов Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро-Уилка (табл. 4) показали, что не все выборки имеют нормальное распределение для Камского водохранилища:

1. Выявлено в результате оценки еже-секундных колебаний мутности и электропроводности воды в районе Чусовского плеса г. Перми, что выборочный $C_{\text{выб } 600}$ и усредненный $C_{\text{уср } 600}$ ряды при уровне времени продолжительности в 600 значений, т.е. выборки с усреднением в 10 минут, можно считать нормально распределенными. Выборочные ($C_{\text{выб } 10}$ и $C_{\text{выб } 60}$) и усредненные ($C_{\text{уср } 10}$ и $C_{\text{уср } 60}$) ряды при уровне времени продолжительности в 10 и 60 зна-

Таблица 4.

Критерии оценки нормальности распределения содержания электропроводности и мутности воды для Камского водохранилища

Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка	Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка	Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка
1. участок Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми (v=1/с)			2. участок Камского водохранилища в районе г. Березники (v=1/с)			3. участок Камского водохранилища в районе г. Березники (v=12/час)		
Электропроводность воды								
Сперв	0,137, p<0.01	-	Сперв	0,236, p<0.01	0,839, p=0	Сперв	0,112, p<0.01	0,963, p=0
C _{выб 10}	0,136, p<0.01	0,899, p=0	C _{выб 30}	0,244, p<0.01	0,83, p=0	C _{выб 3}	0,104, p< n.s.	0,966, p=0.02
C _{выб 60}	0,137, p<0.05	0,896, p=0	C _{выб 60}	0,242, p<0.05	0,823, p=0,0001	C _{выб 10*}	0,122, p< n.s.	0,943, p=0,129
C _{выб 600*}	0,2, p<n.s.	0,891, p=0,08	C _{выб 90*}	0,251, p<0,1	0,825, p=0,002	C _{выб 30*}	0,179, p<n.s.	0,932, p=0,463
C _{уср 10}	0,131, p<0.01	0,899, p=0	C _{уср 30}	0,237, p<0.01	0,843, p=0	C _{уср 3*}	0,076, p< n.s., Lilliefors-p < 1	0,966, p=0,018
C _{уср 60}	0,138, p<0.05	0,897, p=0	C _{уср 60*}	0,222, p<0,1	0,854, p=0,0005	C _{уср 10*}	0,1, p< n.s.	0,953, p=0,24
C _{уср 600*}	0,189, p< n.s.	0,929, p=0,3	C _{уср 90*}	0,246, p< 0,1	0,849, p=0,0042	C _{уср 30*}	0,184, p< n.s.	0,952, p=0,697
Мутность воды								
Сперв	0,172, p<0.01	-	Сперв	0,114, p<0.01	0,82, p=0	Сперв	0,13, p<0.01	0,862, p=0
C _{выб 10}	0,184, p<0.01	0,867, p=0	C _{выб 30}	0,119, p< n.s.	0,922, p=0,0007	C _{выб 3}	0,154, p<0.05	0,843, p=0
C _{выб 60}	0,185, p<0.01	0,872, p=0	C _{выб 60*}	0,115, p< n.s.	0,943, p=0,094	C _{выб 10}	0,186, p< n.s.	0,912, p=0,02
C _{выб 600*}	0,23, p< n.s., Lilliefors-p < 0.05	0,862, p=0,03	C _{выб 90*}	0,227, p< 0,15	0,913, p=0,06	C _{выб 30*}	0,184, p< n.s.	0,936, p=0,511
C _{уср 10}	0,179, p<0.01	0,84, p=0	C _{уср 30}	0,215, p<0.01	0,887, p=0,00003	C _{уср 3}	0,169, p<0.05	0,873, p=0
C _{уср 60}	0,214, p<0.01	0,833, p=0	C _{уср 60}	0,243, p<0.05	0,88, p=0,002	C _{уср 10}	0,263, p<0.05	0,829, p=0,0004
C _{уср 600*}	0,198, p< n.s., Lilliefors-p < 0.15	0,839, p=0,02	C _{уср 90*}	0,255, p< 0,1	0,85, p=0,005	C _{уср 30*}	0,331, p< 0,2	0,779, p=0,008

* подчиняются нормальному закону распределения

чений, т.е. выборки с усреднением в 10 секунд и 1 минуту, не описываются нормальным распределением.

2. Показано для ежесекундных колебаний мутности воды в районе г. Березники, что только усредненный ряд $C_{уср 90}$ и выборочные $C_{выб 60}$, $C_{выб 90}$ нормально распределенные, при уровне времени продолжительности в 60 и 90 значений, т.е. с усреднением в 1 и 1.5 минуты. Для ежесекундных колебаний электропроводности нормальным распределением описываются выборочные ряды $C_{выб 90}$ и усредненные $C_{уср 60}$, $C_{уср 90}$ при уровне времени продолжительности в 60 и 90 значений, т.е. выборки с усреднением в 1 и 1.5 минуты.

3. Установлено для 5-минутных колебаний электропроводности в районе г. Березники, что только усредненные ряды $C_{уср 3}$, $C_{уср 10}$, $C_{уср 30}$ и выборочные $C_{выб 10}$, $C_{выб 30}$ нормально распределены, при уровне времени продолжительности в 3, 10 и 30 значений. Для 5-минутных колебаний мутности воды нормальному закону распределения подчиняются выборочные ряды $C_{выб 30}$ и усредненные $C_{уср 30}$ при уровне времени продолжительности в 30 значений, т.е. выборки с усреднением в 2.5 часа.

Поэтому для корректной и объективной оценки влияния ежесекундных колебаний на характер времени продолжительности (масштаб усреднения) с учетом характера выборки (выборочный, усредненный ряды) представляется необходимым использовать непараметрические методы, например, критерий Краскела-Уоллиса.

Дисперсионный анализ результатов выполненных исследований проведен поэтапно на основе критериев Фишера (F), Краскела-Уоллиса ($KW-H$), реализованных в программе Statistica [16]. На первом этапе поочередно учитывалось взаимодействие уровней времени про-

должительности (масштаба усреднения) и характера выборки (выборочный, усредненный ряд) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности (первичный ряд) при отсутствии совместного влияния уровней времени продолжительности. На втором этапе учитывалось влияние ежесекундных и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности на характер выборки с учетом совместного влияния уровней времени продолжительности.

Дисперсионный анализ поочередного влияния времени продолжительности и характера выборки на ежесекундные и 5-минутные колебания физических показателей качества воды (1 этап)

На первом этапе был проведен дисперсионный анализ с помощью параметрического критерия Фишера, используемого для сравнения средних значений всех выборок, и непараметрического критерия Краскела-Уоллиса для сравнения медианы всех групп, ввиду невыполнения условий нормальности распределения.

При этом поочередно учитывалось взаимодействие уровней времени продолжительности (масштаба усреднения) и характера выборки (выборочный, усредненный ряд) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности (первичный ряд) без учета совместного влияния масштаба усреднения.

Статистика критериев Фишера и Краскела-Уоллиса на примере Камского водохранилища показывает (табл. 5), что нет статистически значимых различий средних значений и медиан при поочередном сравнении различных масштабов усреднения выборочного, усредненного рядов на первичный ряд ежесекундных и 5-минутных значений мутности и электропроводности, т.е. для всех выборок p -значение оказывается больше 0.05.

Результаты дисперсионного анализа выявили отсутствие для всех выборок статистически значимых различий средних значений в исследуемых рядах, например, для Камского водохранилища в районе г. Перми (рис. 5).

Таким образом, результаты дисперсионного анализа подтвердили отсутствие влияния ежесекундных и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности

(первичный ряд) на характер выборки (выборочный, усредненный ряд).

В дальнейшем для более подробного дисперсионного анализа рассмотрено совместное влияние уровней времени продолжительности (масштаба усреднения) и типа выборки (выборочный, усредненный ряд) на характер колебаний мутности и электропроводности (первичный ряд).

Таблица 5.

Критерии оценки различий средних значений *F* и медианы *KW-H* для выборок мутности и электропроводности воды Камского водохранилища

Наименование групп	$S_{в\text{ьб}} + S_{у\text{ср}} + S_{п\text{ерв}}$		
в районе Чусовского плеса г. Перми			
Название	$S_{в\text{ьб } 10} + S_{у\text{ср } 10} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 60} + S_{у\text{ср } 60} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 600} + S_{у\text{ср } 600} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;9932) = 0.002;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;9935) = 0.004;$ $p = 0.99$	$F(2;8552) = 0.006;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;8555) = 0.009;$ $p = 0.99$	$F(2;8304) = 0.1;$ $p = 0.90$ $KW-H(2;8307) = 0.22;$ $p = 0.89$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;9932) = 0.06;$ $p = 0.95$ $KW-H(2;9935) = 0.95;$ $p = 0.62$	$F(2;8552) = 0.02;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;8555) = 0.08;$ $p = 0.96$	$F(2;8304) = 0.08;$ $p = 0.92$ $KW-H(2;8307) = 1.28;$ $p = 0.53$
в районе г. Березники ($v=1/c$)			
Название	$S_{в\text{ьб } 30} + S_{у\text{ср } 30} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 60} + S_{у\text{ср } 60} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 90} + S_{у\text{ср } 90} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;1984) = 0,02;$ $p = 0,98$ $KW-H(2;1987) = 0,08;$ $p = 0,96$	$F(2;1922) = 0,06;$ $p = 0,94$ $KW-H(2;1925) = 0,28;$ $p = 0,87$	$F(2;1900) = 0,004;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;1903) = 0,002;$ $p = 0,99$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;293) = 0,21;$ $p = 0,81$ $KW-H(2;296) = 0,35;$ $p = 0,84$	$F(2;1922) = 0,77;$ $p = 0,46$ $KW-H(2;1925) = 1,55;$ $p = 0,46$	$F(2;1900) = 0,03;$ $p = 0,97$ $KW-H(2;1903) = 0,49;$ $p = 0,78$
в районе г. Березники ($v=12/\text{час}$)			
Название	$S_{в\text{ьб } 3} + S_{у\text{ср } 3} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 10} + S_{у\text{ср } 10} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 30} + S_{у\text{ср } 30} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;457) = 0,002;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;460) = 0,001;$ $p = 0,99$	$F(2;329) = 0,06;$ $p = 0,94$ $KW-H(2;332) = 0,14;$ $p = 0,93$	$F(2;293) = 0,19;$ $p = 0,82$ $KW-H(2;296) = 0,19;$ $p = 0,91$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;457) = 0,19;$ $p = 0,83$ $KW-H(2;460) = 1,16;$ $p = 0,56$	$F(2;329) = 0,002;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;332) = 0,27;$ $p = 0,87$	$F(2;293) = 0,21;$ $p = 0,81$ $KW-H(2;296) = 0,35;$ $p = 0,84$

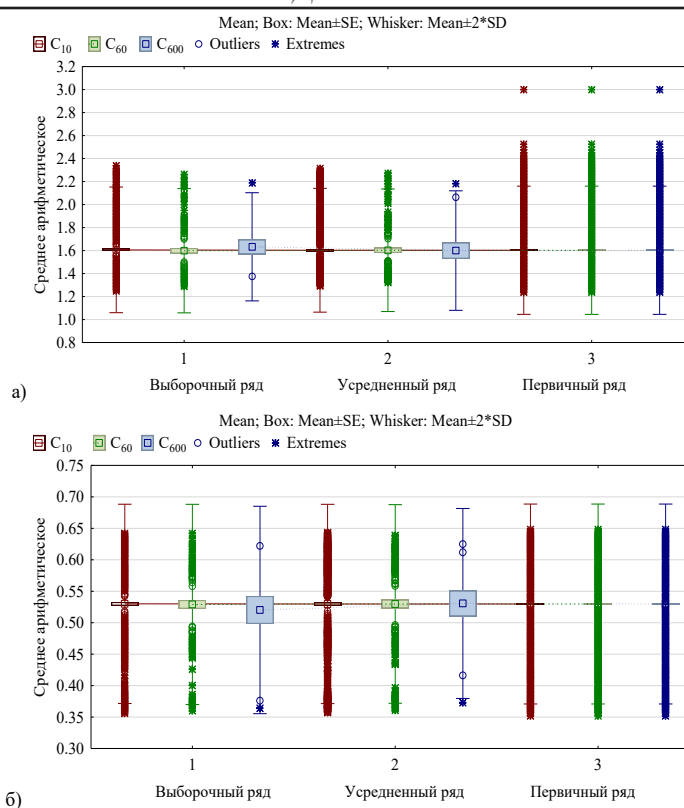


Рис. 5. Диаграмма размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса в г. Перми (mean – среднее арифметическое значение, SE – среднеквадратическая ошибка, SD – среднеквадратическое отклонение, Outliers – выбросы; Extremes – экстремумы)

Дисперсионный анализ с учетом совместного влияния масштаба усреднения и характера выборки на ежесекундные и 5-минутные колебания физических показателей качества воды (2 этап)

На втором этапе был проведен более подробный дисперсионный анализ при наличии совместного взаимодействия масштаба усреднения и характера выборки (выборочный, усредненный ряды) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности. Немаловажно, что на первом этапе влияние характера выборки и уровней времени продолжительности на характер колебаний мутности и электропроводности отсутствовало. При совместном учете характера выборки и уровней времени продолжительности результаты дисперсионного анализа выявили влияние применяемого типа выборки и ха-

рактера уровня масштаба усреднения на колебания показателей качества воды (рис. 6, табл. 6, где SS – вариабельность (сумма квадратов отклонений), MS – дисперсия, F – критерий Фишера, p – уровень значимости, df – степень свободы). Результаты дисперсионного анализа показали, что отсутствуют статистически значимые различия средних значений колебаний мутности и электропроводности для участков Камского водохранилища:

1. усредненных выборок в 10 минут (уровень времени продолжительности в 600 значений) и ежесекундных колебаний мутности и электропроводности в районе Чусовского плеса г. Перми;

2. усредненных и выборочных рядов в 1 и 1.5 минуты (уровень времени продолжительности в 60 и 90 значений) и ежесекундных колебаний мутности и электропроводности в районе г. Березники;

Статистические характеристики оценки различий средних значений на основе критерия Фишера F для всех подгрупп выборок мутности и электропроводности воды на примере Камского водохранилища

Название	df	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Чусовской плес г. Перми		$S_{в\bar{b} 10} + C_{с\bar{c} 10} + C_{сл\bar{e} 10}$				$S_{в\bar{b} 60} + C_{с\bar{c} 60} + C_{сл\bar{e} 60}$				$S_{в\bar{b} 600} + C_{с\bar{c} 600} + C_{сл\bar{e} 600}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	21.8	21.8	3471	0	21.9	21.9	3479	0	17.5	17.5	2770	0
Между группами	2	0.221	0.11	17.5	0	0.225	0.113	17.9	0	0.001	0.001	0.101	0.904
Внутри групп	8304	52.2	0.006			52.2	0.006			52.4	0.006		
Общая	8306	52.5				52.5				52.4			
Мутность													
Свободный член	1	129	129	1671	0	131	131	1697	0	163	163	2105	0
Между группами	2	1.784	0.892	11.516	0.00001	1.552	0.776	10.017	0.00005	0.013	0.006	0.082	0.922
Внутри групп	8304	643	0.078			643	0.078			645	0.078		
Общая	8306	645				645				645			
г. Березники (v=1/с)		$S_{в\bar{b} 30} + C_{с\bar{c} 30} + C_{сл\bar{e} 30}$				$S_{в\bar{b} 60} + C_{с\bar{c} 60} + C_{сл\bar{e} 60}$				$S_{в\bar{b} 90} + C_{с\bar{c} 90} + C_{сл\bar{e} 90}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	489	489	433	0	291	291	252	0	218	218	189	0
Между группами	2	51.9	25.9	23.0	0	4.815	2.408	2.084	0.125	0.008	0.0041	0.004	0.996
Внутри групп	1900	2146	1.1294			2195	1.155			2192	1.154		
Общая	1902	2198				2200				2192			
Мутность													
Свободный член	1	4078	4078	8248	0	3739	3739	7545	0	3653	3653	7354	0
Между группами	2	10.6	5.3	10.7	0.00002	0.58	0.29	0.586	0.557	0.033	0.017	0.033	0.967
Внутри групп	1900	939	0.494			941	0.495			944	0.497		
Общая	1902	950				942				944			
г. Березники (v=12/час)		$S_{в\bar{b} 3} + C_{с\bar{c} 3} + C_{сл\bar{e} 3}$				$S_{в\bar{b} 10} + C_{с\bar{c} 10} + C_{сл\bar{e} 10}$				$S_{в\bar{b} 30} + C_{с\bar{c} 30} + C_{сл\bar{e} 30}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	3.503	3.503	29759	0	3.447	3.447	28851	0	3.293	3.293	26353	0
Между группами	2	0.002	0.001	10.34	0.00005	0.001	0.001	5	0.007	0.00005	0.00002	0.2	0.823
Внутри групп	293	0.034	0.0001			0.035	0.0001			0.037	0.0001		
Общая	295	0.037				0.036				0.037			
Мутность													
Свободный член	1	1815	1815	4799	0	1807	1807	4781	0	1877	1877	4822	0
Между группами	2	1.086	0.543	1.436	0.239	1.392	0.696	1.841	0.16	0.165	0.082	0.212	0.809
Внутри групп	293	111	0.378			111	0.378			114	0.389		
Общая	295	112				112				114			

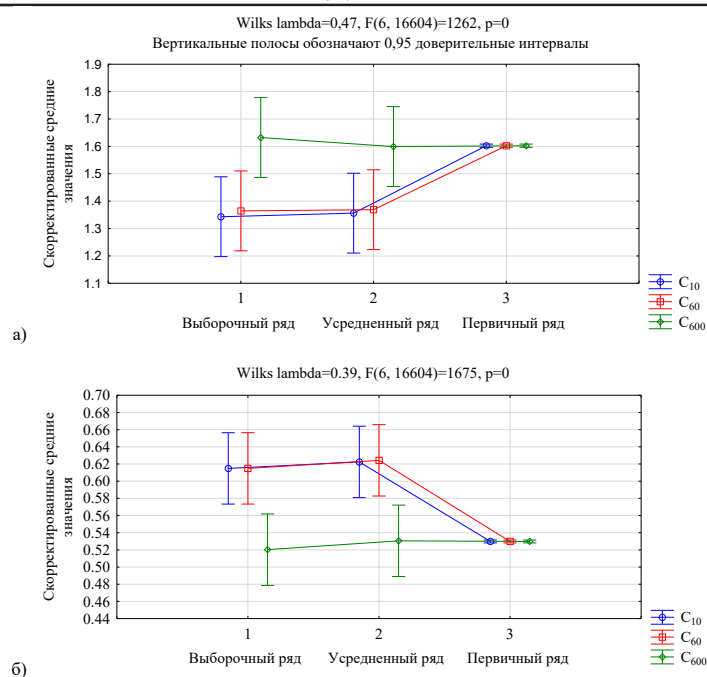


Рис. 6. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса в г. Перми ($v=1/c$)

3. усредненных и выборочных рядов в 2.5 часа (уровень времени продолжительности в 30 значений) и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности в районе г. Березники.

При этом наблюдаемые оценочные предельные значения по оси ординат на диаграммах размаха мутности и электропроводности (рис. 6-8), полученные методом наименьших квадратов, являются скорректированными средними значениями зависимых переменных (выборочный, усредненный ряды) при различных комбинациях уровней независимых переменных (масштабов усреднения) (ковариаты) [18].

Как следует из диаграмм размаха, показана удовлетворительная стабильность средних значений ежесекундных выборок с усреднением в 10 минут в районе Чусовского плеса г. Перми (рис. 6); ежесекундных выборок с усреднением в 1.5 минуты (рис. 7) и выборки 5-минутных колебаний с масштабом усреднения в 2.5 часа (рис. 8) для участка Камского водохрани-

лища в районе г. Березники, на примере таких физических показателей качества воды, как электропроводность и мутность воды.

Данные показатели имеют хорошие линейные связи с химическими показателями: электропроводность с макрокомпонентами, в первую очередь, с хлоридами, и соответственно, минерализацией, а мутность со взвешенными веществами.

Показано, что частота отбора проб и продолжительность забора воды с использованием интегрального метода отбора проб оказывает значительное влияние на объективность, корректность оценки состояния водного объекта.

Принципиальную важность имеет не только частота отбора проб воды, но и масштаб усреднения, т.е. время (продолжительность) забора воды. Так как информация, с какой продолжительностью необходимо проводить забор воды, отсутствует в действующих нормативных документах [17], то возникает необходимость ее учета при выборе оптимальной системы отбора

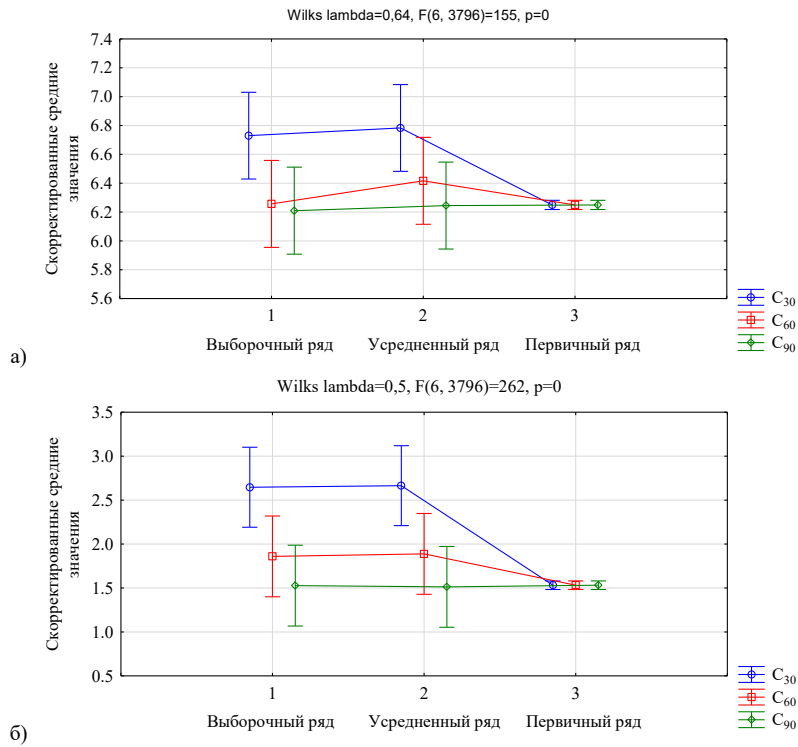


Рис. 7. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе г. Березники ($\nu=1/c$)

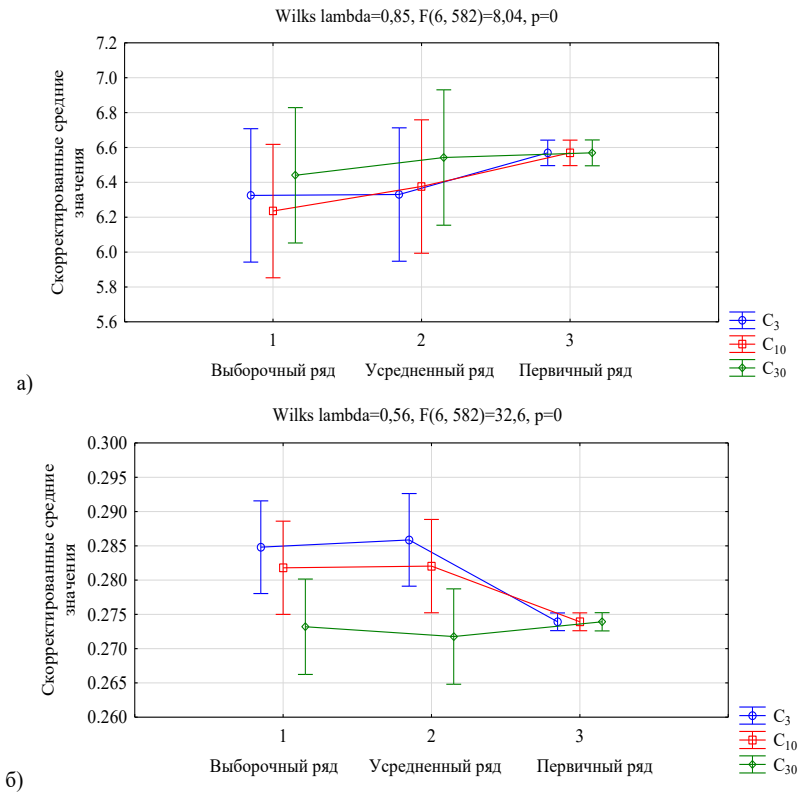


Рис. 8. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе г. Березники ($\nu=12/час$)

проб (традиционная, интегральная или пассивная [4-12]). Выбор системы помогает обеспечить получение и стабильность продолжительности забора воды и частоты отбора проб воды репрезентативного ряда натуральных наблюдений, что является залогом получения правильных результатов анализа.

Заключение

В работе рассмотрены основные принципы применения как параметрического метода – однофакторного дисперсионного анализа – для сравнения средних арифметических значений, так и непараметрического метода, если условия нормальности распределения не соблюдаются, – критерия Краскела-Уоллиса для ежесекундных и 5-минутных колебаний значений мутности и электропроводности воды на примере двух участков Камского водохранилища.

Показано, что выборки с различными вариантами группировки по средним значениям и выборкой каждого n -значения статистически незначимы, и эти факторы не влияют на результаты средних значений выборок, кроме выборок, взятых с 10-минутным усреднением из первичного ряда ежесекундных наблюдений, как для мутности, так и для электропроводности в районе ЧОС, также 5-минутных выборок с 2.5-часовым усреднением и ежесекундных выборок с усреднением в 1.5 минуты для Камского водохранилища в районе г. Березники.

Можно сделать вывод о необходимости отбора проб воды интегральным методом с временным масштабом усреднения в 10 минут для Камского водохранилища в районе ЧОС и усреднением в 1.5 мин в районе г. Березники для ежесекундных колебаний мутности и электропроводности воды.

Поэтому принципиально важно использовать оценки особенностей форми-

рования турбулентных и когерентных структур водных масс для учета внутрисуточных колебаний показателей качества воды и проводить натурные полевые исследования в этом районе с существенно большей частотой измерения, чем 1 раз в сутки, на основе современных методов измерения. Представляется целесообразным использовать вместо традиционного мониторинга с отбором проб воды батометром с усреднением около 20 секунд интегральный метод отбора проб воды, когда продолжительность забора воды батометром достигает 10 минут с последующим усреднением. Хотя этот метод является более трудоемким, однако позволяет, в отличие от точечного отбора, значительно снизить влияние случайных флуктуаций в содержании показателей качества воды и иметь более стабильные и репрезентативные результаты, вследствие учета и анализа усредненных за достаточно продолжительные отрезки времени, а не только мгновенных значений в конкретный момент, при этом также могут быть выявлены кратковременные потоки, которые могут быть пропущены при разовом отборе.

Представляется необходимым учитывать, что масштабы временного усреднения могут существенно варьировать в зависимости от особенностей гидродинамики водных объектов. При этом в рекомендациях Р 52.24.353 – 2012 «Отбор проб поверхностных вод суши» [17] нет информации о масштабах усреднения (продолжительности забора воды), присутствует только обобщенная информация о частоте отбора проб.

В настоящее время определение контролируемых показателей качества воды с такой частотой возможно только при использовании автоматических систем, основанных на физических методах их определения, только для удельной электропроводности и мутности воды, кото-

рые хорошо связаны с большинством лимитирующих показателей качества воды. Поэтому, возможно, полученные выводы для рассматриваемых показателей могут быть перенесены на показатели качества воды, определяемые химическим методом. Таким образом, эффективная систе-

ма мониторинга должна быть комбинированной, включать в себя как традиционные методы определения химических ингредиентов с частотой 1/мес, так и современные методы измерения физических показателей качества воды со значительно большей частотой.

Библиографический список

1. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Возняк А.А., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С.* Особенности регулирования качества воды при ее селективном заборе из водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 56-68.
2. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В., Онутин М.А., Синцова Т.Н.* Особенности внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище // Географический вестник. 2024. №3 (70). С. 70-82.
3. *Синцова Т.Н., Онутин М.А.* Внутрисуточные колебания качества воды Камского водохранилища // Успехи современного естествознания. 2024. №8. С. 30-35.
4. *Torres C., Gitau M.W., Paredes-Cuervo D.* et al. Evaluation of sampling frequency impact on the accuracy of water quality status as determined considering different water quality monitoring objectives // Environ Monit Assess. 194, 489. 2022.
5. *Hayes E.K. and Gagnon G.A.* From capture to detection: A critical review of passive sampling techniques for pathogen surveillance in water and wastewater // Water Research 261. 2024. 122024. P. 1-14.
6. *da Luz N., Tobiasson J.E., Kumpel E.* Water quality monitoring with purpose: Using a novel framework and leveraging long-term data // Science of the Total Environment 818. 2022. 151729. P. 1-12.
7. *de Almeida R.G.B., Lamparelli M.C., Dodds W.K.* et al. Sampling frequency optimization of the water quality monitoring network in São Paulo State (Brazil) towards adaptive monitoring in a developing country // Environ Sci Pollut Res 30, 111113–111136. 2023.
8. *Thompson J., Pelc C.E., Jordan T.E.* Water quality sampling methods may bias evaluations of watershed management practices // Science of the Total Environment 765 (2021) 142739. P. 1-8.
9. *Babitsch D., Berger E., Sundermann A.* Linking environmental with biological data: Low sampling frequencies of chemical pollutants and nutrients in rivers reduce the reliability of model results // Science of the Total Environment, 772, 145498. 2021. P. 1-23.
10. USGS. Next generation water observing system: Delaware river basin // U.S. Geological Survey. 2021.
11. *Haskell, B.R., Dhiyebi, H.A., Srikanthan, N., Bragg, L.M., Parker, W.J., Giesy, J.P.*, et al., 2024. Implementing an adaptive, two-tiered SARS-CoV-2 wastewater surveillance program on a university campus using passive sampling. Sci. Total Environ. 912, 168998. 2024.
12. *Law I.* Application of passive sampling for the monitoring of microbiological contaminants in aquatic systems. Fulfilment for the degree of master of science in pathobiology. 2024.
13. Интернет-адрес Valeport MIDAS ECM <https://www.valeport-co-uk>
14. *Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A.* Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol. 2014. V.508. P.328-342.
15. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. 816 с.
16. Statistica компании StatSoft [StatSoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru>].
17. Р 52.24.353–2012 Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ростов-на-Дону. Росгидромет. ФГБУ «ГХИ», 2012. 40 с.
18. *Keppel, G.* Design and analysis: A researcher's handbook (3rd ed.). Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc. 1991.

**STATISTICAL ASPECTS OF DAILY FLUCTUATIONS OF WATER QUALITY INDICATORS
(ON THE EXAMPLE OF THE KAMA RESERVOIR)**

Sintsova T.N.¹, Lepikhin A.P.¹, Rozental O.M.², Levin L.Y.¹, Bogomolov A.V.¹

¹*Mining Institute UB RAS*

²*Institute of Water Problems RAS*

For citation:

Sintsova T.N., Lepikhin A.P., Rozental O.M., Levin L.Y., Bogomolov A.V. Statistical aspects of daily fluctuations of water quality indicators (on the example of the Kama reservoir) // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 17–35. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.2>

Water bodies located in zones of active technogenesis are characterized by significant time variability of hydrochemical indicators of water quality. When conducting traditional monitoring of water bodies with water sampling using standard bathometers, the values of monitored water quality indicators are determined, as a rule, with a characteristic time averaging of ~10 seconds. The problem arises, however, as to how do these indicators relate to their average daily values? What should be the minimum averaging period in order to obtain objective average daily values of the considered water quality indicators? The paper considers the application of the analysis of variance to study every-second and five-minute observations of water conductivity and turbidity for two sections of the Kama Reservoir: the Chusovskoy Ples area of Perm and the Berezniki area. It has been demonstrated that water quality monitoring in the Perm area of the Kama Reservoir should be based on the evaluation of integral sampling methods with a time averaging scale of at least 10 minutes. At the same time, with regard to the Kama reservoir near Berezniki, the need for integrated sampling with averaging of at least 1.5 minutes is confirmed.

Keywords: analysis of variance, arithmetic mean, variance, Kama reservoir.

Сведения об авторах

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер лаборатории проблем гидрологии суши, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: lepin49@mail.ru

Левин Лев Юрьевич, доктор технических наук, чл.-корр. РАН, директор «ГИ УрО РАН»; e-mail: aerolog_lev@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: whitewing85@mail.ru

Розенталь Олег Моисеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории управления водными ресурсами, Институт водных проблем РАН («ИВП РАН»), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: omro3@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 10.10.2025

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НОВЫХ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ*

Т.В. Полюдова, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

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

А.Н. Лобанов, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

Д.В. Ерошенко, *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН,*

Институт технической химии УрО РАН

Для цитирования:

Полюдова Т.В., Антипьева М.В., Лобанов А.Н., Ерошенко Д.В. Обзор подходов к определению антибактериальной активности новых природных и синтетических соединений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 36–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.3>

Высокий интерес к исследованию и разработке новых антимикробных препаратов из различных источников обусловлен стремительно возрастающей угрозой микробной резистентности. В связи с этим все больше внимания уделяется методам скрининга и оценки антимикробной активности. Некоторые виды тестирования, такие как диско-диффузионный метод, метод диффузии в лунках агар и разведение в бульоне, хорошо известны и широко используются. Однако способы оценки действия на биопленки, выявление и пути ингибирования покоящихся форм не получили широкого распространения. Такие методы, как проточная цитофлуорометрия, флуоресцентные и биолюминесцентные методы, позволяют быстро получить результаты оценки действия антимикробных соединений и понять их влияние на жизнеспособность и повреждение клеток, однако требуют специального оборудования и дальнейшей оценки воспроизводимости и стандартизации. В данной статье представлен обзор комплекса методов определения чувствительности бактерий, которые используются для анализа новых соединений с антибактериальным потенциалом. В работе представлены широко известные, а также разработанные в лаборатории методы детекции антибактериальной активности. К ним относятся способы выявления штаммов-антагонистов, продуцирующих антимикробные соединения, количественная оценка антибактериальной активности, выявление покоящихся форм бактерий, ингибирование адгезии бактерий на твердой поверхности, действие антибактериальных соединений на формирование биопленок и на зрелые биопленки, изучение механизма действия, а также усиление антимикробных свойств.

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 124020500028-4 «Биоразнообразие микроорганизмов антропогенно загрязненных экосистем и функционально-генетические механизмы их адаптации к стрессовым условиям окружающей среды».

Ключевые слова: антибактериальная активность, антибактериальные соединения, биопленки, индикаторные штаммы, минимальная ингибирующая концентрация, покоящиеся формы.

Актуальность

Перманентный мониторинг распространения антибиотикорезистентных микроорганизмов в популяциях человека и животных убедительно демонстрирует колоссальный успех бактерий и микромицетов в адаптации к антибиотическим лекарственным средствам [1]. Несмотря на постоянный поиск новых антимикробных средств, интенсивность их разработки и внедрения существенно уступает скорости приобретения микроорганизмами резистентности к подобным соединениям. Вместе с тем источники эффективных противомикробных соединений давно известны. Как правило, антибиотики – это природные соединения, выделяемые самими бактериями и грибами с целью подавления ближайшего конкурентного окружения [2, 3]. Вещества со специфической антимикробной активностью известны у представителей всех царств и отделов живой природы. С завидной регулярностью происходит выделение бактерий-продуцентов антибиотических соединений, поскольку они являются более удобными объектами для поиска и выделения биологически активных веществ [4, 5]. Многие из этих соединений хорошо изучены и применяются в практической деятельности человека [6, 7].

Кроме того, во всем мире огромное количество новых перспективных соединений создаётся путем химического синтеза [8, 9]. Значительная часть таких синтезированных веществ еще не получила широкого признания из-за ограниченного объема знаний об их биоактивном потенциале. Вещества, обладающие высокой антибактериальной активностью в сочетании с практической применимостью, встречаются относительно редко. Большинство антибиотиков разрабатывается

на основе существующих и известных молекулярных структур, функциональная активность которых усиливается за счет модификации периферических групп [10]. Тем не менее, возникновение резистентности у современных бактерий требует поиска новых соединений с принципиально новыми химическими структурами.

Важнейшим этапом поиска и создания новых антимикробных веществ является выявление их активности с подбором тест-штамма и определением спектра чувствительных микроорганизмов. Выявление антибактериальной активности (АБА) новых соединений возможно различными способами, которые позволяют установить характер их действия (бактериостатический или бактерицидный), минимальные ингибирующие концентрации, стимулирование образования покоящихся форм или их уничтожение, ингибирование прорастания спор и формирование биопленок, а также постантибиотический эффект [11].

Целью работы явился обзор методов детекции АБА различных соединений, разработанных в Лаборатории биохимии развития микроорганизмов «ИЭГМ УрО РАН».

Выбор индикаторных штаммов

Многие антимикробные соединения могут проявлять активность достаточно быстро, вызывая нарушение физической целостности клеточной мембраны и/или проникая в цитоплазму бактерий и воздействуя на внутриклеточные мишени. Общеизвестным является то, что взаимодействие с мембраной является ключевым фактором прямой антимикробной активности, как в случае воздействия на саму мембрану, так и в случаях внутриклеточных мишеней [12]. Электростати-

ческие и гидрофобные силы между молекулами антимикробных соединений и поверхностью бактерий являются критическими детерминантами этого взаимодействия. Поскольку бактерии делятся на две группы (грамположительные и грамотрицательные) на основе различий в структуре клеточной стенки, целесообразно при тестировании новых соединений использовать представителей обеих групп. В качестве индикаторных штаммов для оценки активности новых соединений чаще всего используют референсный штамм грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* ATCC 25922, грамположительных – *Staphylococcus* spp. Поскольку группа стафилококков делится на коагулазопозитивные (КПС) и коагулазонегативные виды (КНС), тестирование проводится на штаммах КНС *Staphylococcus epidermidis* ATCC 29887 и *S. epidermidis* ATCC 12228 и КПС *Staphylococcus aureus* ATCC 25923. Для выявления потенциала противотуберкулезной активности новых соединений в качестве тест-бактерий также используется модельный организм *Mycobacterium smegmatis*, родственный патогенным бактериям *Mycobacterium tuberculosis*, которые обладают особыми свойствами клеточной стенки. Пептидогликан бактерий рода *Mycobacterium* ковалентно связан с арабиногалактаном, концы которого этерифицированы миколовыми кислотами, образующими внутренний слой внешней мембраны микобактерий, известный как микомембрана. Микомембрана определяет физические и химические свойства поверхности клеток и придаёт им выраженную гидрофобность [13]. Соединения, обладающие гидрофобной природой, могут иметь высокое сродство с микомембранами и обладать противотуберкулезным потенциалом [14, 15].

Для детекции АБА при поиске бактериоцинов в лаборатории охарактеризован штамм *Staphylococcus cohnii* ВКМ-3165,

являющийся высокочувствительным к катионным пептидам. Высокая чувствительность к бактериоцинам стафилококков и лактококков, а также другим антибактериальным пептидам катионной природы, подтверждена экспериментальным путем. Кроме того, анализ генома *S. cohnii* ВКМ-3165 показал, что в нем не содержатся гены вирулентности и устойчивости к антибиотикам и антибактериальным пептидам, а также отсутствует ген множественной пептидной устойчивости (*mprF*). Полная последовательность генома штамма *S. cohnii* ВКМ-3165 депонирована в базу данных NCBI под номером GCA_050171255.1. Выявленные свойства *S. cohnii* ВКМ-3165 позволяют рекомендовать его в качестве безопасного индикаторного штамма для выявления антибактериальной активности катионных пептидных соединений, в том числе бактериоцинов.

Способы выявления штаммов-антагонистов, продуцирующих антимикробные соединения

Микроорганизмы, обладающие способностью синтезировать специфические факторы антагонизма, постоянно присутствуют в окружающей нас среде. Простым и наглядным методом скрининга микробов-антагонистов является метод перпендикулярных штрихов [16], который позволяет оценить спектр микроорганизмов, чувствительных к синтезируемому продуктом соединению. Пример такого способа детекции приведён на рис. 1. При расшифровке результатов теста сделан вывод о выраженной антагонистической активности *Staphylococcus warneri* KL-1 в отношении грамположительных бактерий (*Enterococcus faecalis* NCIMB 13280, *Listeria innocua* M-2, *Lactococcus lactis* NCDO763, *M. smegmatis* mc² 155, *M. smegmatis* ГИСК 167, *S. cohnii* ВКМ-3165, *S. epidermidis* ATCC 12228). Ранее

нами было показано, что *S. warneri* KL-1 является продуцентом катионного пептида варнерина (AP 02801 <https://aps.unmc.edu/database/peptide>) [17].

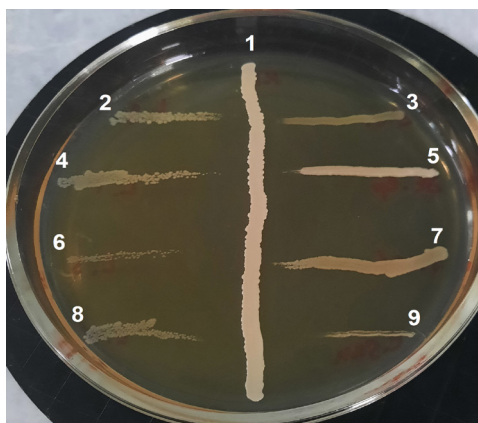


Рис. 1. Антагонистическая активность *S. warneri* KL-1 (1) в отношении бактерий *E. faecalis* NCIMB 13280 (2), *L. innocua* M-2 (3), *S. epidermidis* ATCC 12228 (4), *L. lactis* NCDO-763 (5), *M. smegmatis* mc² 155 (6), *E. coli* ATCC 25922 (7), *M. smegmatis* ГИСК 167 (8), *S. cohnii* ВКМ-3165 (9), выявленная методом перпендикулярных штрихов.

Быстрым и наглядным способом выявления антибактериальной активности в растворах является метод, основанный на диффузии вещества в плотную питательную среду. В качестве уплотнителя питательной среды нами используется агароза (0,8%), а в качестве питательной основы – среда Мюллера-Хинтона (МН), рекомендованная Институтом клинических и лабораторных стандартов (Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) США) для тестирования антибактериальной активности [18]. Использование агарозы вместо агара позволяет получить менее плотную гелевую пластинку, в которой создаются благоприятные условия для развития предварительно иммобилизованных в неё тест-бактерий. Диффузия исследуемого соединения, стерильные аликвоты которого наносятся поверх агарозной пластинки, происходит более равномерно, поскольку агароза в водной сре-

де образует гель с большими порами, размер которых определяется ее концентрацией. Структура геля такова, что позволяет биологическим молекулам беспрепятственно и равномерно диффундировать в гелевом слое [19]. Зоны подавления роста микроорганизмов в местах аппликации растворов, содержащих антибактериальные факторы, выявляются после периода инкубации (24-48 ч) при оптимальной для тест-бактерий температуре (рис. 2).

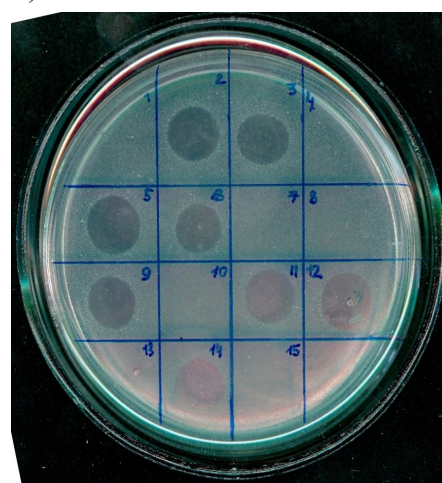


Рис. 2. Детекция АБА стерильных сред культивирования бактерий разных штаммов КНС. В качестве тест-бактерий использовали *S. cohnii* ВКМ-3165. Антибактериальная активность выявлена в образцах 2, 3, 5, 6, 9, 11, 12 и 14.

Данный метод может служить простым, экономичным и удобным инструментом для выявления антагонистической активности в бесклеточных средах роста бактерий – потенциальных продуцентов антибактериальных соединений и в растворах веществ с потенциальной антибактериальной активностью.

Количественная оценка антибактериальной активности

Для количественной оценки антибактериального действия общепринятым и рекомендованным CLSI является метод двукратных разведений исследуемого пре-

парата в жидкой питательной среде МН, а для бактерий с особыми потребностями к факторам роста используют специальные среды [18]. Так, для оценки чувствительности представителей микобактерий (модельный организм *M. smegmatis*) к антибактериальным соединениям использовали среду Middlebrook 7Н9 или Middlebrook 7Н11 для метода двукратных разведений в агаре [20].

Для визуализации роста индикаторных бактерий по окончании инкубационного периода при постановке теста двукратных микроразведений в стерильных 96-луночных планшетах используются соли тетразолия. Способность солей тетразолия восстанавливаться под действием фермен-

тов дыхательной цепи бактериальной клетки с образованием окрашенного продукта – формазана – позволяет выявить метаболически активные клетки аэробных бактерий [21]. В то же время соли тетразолия не подходят для детекции роста бактерий в анаэробных условиях и выявления покоящихся форм.

Использование раствора 2,3,5-трифенил-тетразолия хлористого позволяет окрасить метаболически активные клетки в красный цвет (рис. 3). Более чувствительной солью тетразолия является тиазолил синий тетразолий бромид (thiazolyl blue tetrazolium bromide; МТТ), окрашивающий метаболически активные клетки в синий цвет.

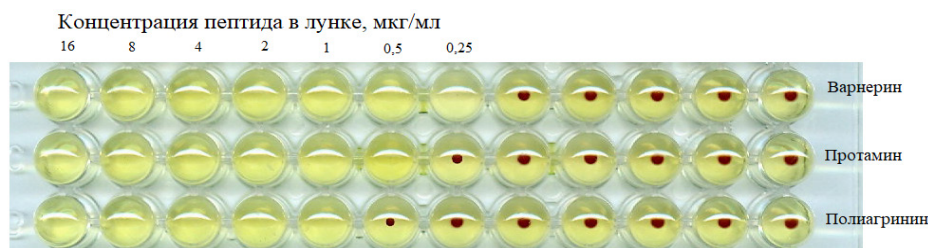


Рис. 3. Визуализация результатов тестирования АБА антимикробных пептидов методом двукратных микроразведений. Живые тест-бактерии *S. cohnii* ВКМ-3165 окрашены 2,3,5-трифенил-тетразолием хлористым

Метод двукратных разведений позволяет установить минимальную ингибирующую (подавляющую) рост бактерий концентрацию (МИК или МПК) исследуемых соединений при условии, что известна исходная концентрация тестируемого вещества (табл. 1). За МИК принимают наименьшую концентрацию исследуемого соединения, при которой не наблюдается рост тестовых микроорганизмов.

Таблица 1.

Значения МИК антимикробных пептидов для тест-бактерий *S. cohnii* ВКМ-3165

Пептид	МИК, мкг/мл
Варнерин	0,25
Протамин	0,5
Поли-L-аргинин	1

Данные таблицы свидетельствуют о том, что антимикробные пептиды по эффективности ингибирования бактерий *S. cohnii* ВКМ-3165 не уступают действию некоторых клинически значимых антибиотиков [22].

В случае, когда невозможно установить точную концентрацию действующего вещества, например, содержание бактериоцинов в культуральных жидкостях (секретах) бактериоциногенных штаммов, количественную характеристику антибактериальной активности выражают в условных единицах активности (ЕА). Условная ЕА равна обратной величине максимального разведения, при котором не обнаружен видимый рост индикаторных бактерий [23].

Минимальные бактерицидные концентрации соединений могут быть определены методом «Flash Microbiocide», который подразумевает перенос аликвот из лунок планшета с тестом на МИК в другой планшет со свежей питательной средой [24]. Результаты данного метода соответствуют референтным методам, описанным в документе M26-A Национального комитета по клиническим лабораторным стандартам (NCCLS-CLSI) [18].

Метод разведений в агаре рекомендован для оценки чувствительности микобактерий к антибиотикам, а также для исследования чувствительности бактерий к отдельным антибиотикам, например, фосфомицину [20, 22]. Кроме того, данный метод применяется для выявления фунгицидной активности соединений [25]. Метод разведения в агаре включает введение желаемых концентраций антимикробного агента в расплавленную агаровую среду, обычно с использованием последовательных двукратных разведений. После засты-

вания среды производят посев определенного микробного инокулята на поверхность агаровой пластины. Формирование колоний на агаре в количестве менее 0,1% от количества колониеобразующих единиц (КОЕ), нанесенных на поверхность агара с инокулятом, интерпретируется как МИК. Определение МИК, подавляющей развитие 99,9% бактерий в инокуляте ($МИК_{99}$), и минимальной бактерицидной концентрации (МБК) методом разведения в агаре позволяет оценить степень гетерогенности бактериальных культур и выявить наличие антибиотикорезистентных клеток в пределах популяции, чувствительной к антибиотику. $МИК_{99}$ рассматривалась как минимальная концентрация, ингибирующая рост 99,9% клеток, при которой возможен рост нитевидных структур или единичных колоний (рис. 4).

Как правило, значения $МПК_{99}$ и МБК, полученные методом разведения в агаре, превышают таковые, полученные методом разведения в бульоне [20].

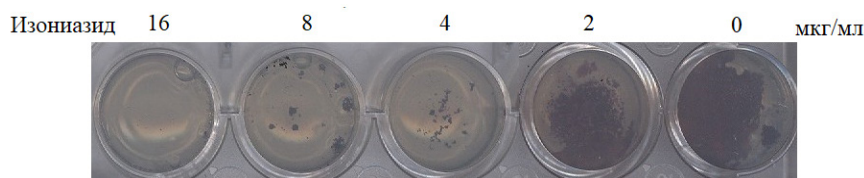
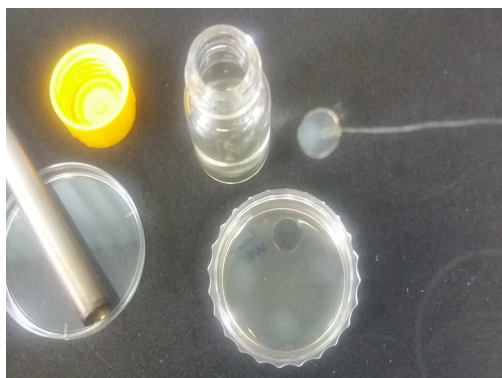


Рис. 4. Пример определения чувствительности *M. smegmatis* mc² 155 к изониазиду методом разведения в агаре Middlebrook 7H11: $МИК_{99}$ – 4 мкг/мл, МБК – 16 мкг/мл.

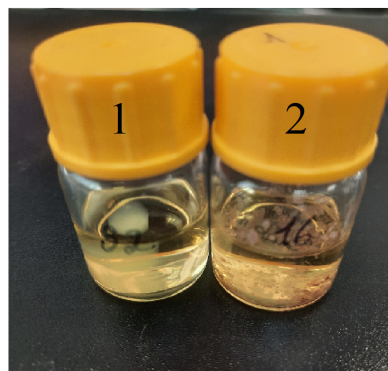
Выявление покоящихся форм бактерий

Известно, что популяции бактерий могут содержать персистирующие и покоящиеся формы, которые не формируют колоний на плотных питательных средах, оставаясь при этом резистентными к действию антимикробного агента [26]. Бактериальные эндоспоры также могут сохранять жизнеспособность в средах, содержащих антибактериальные соединения, но при этом не формируют колонии. Для выявления покоящихся форм на поверхности агара, содер-

жащего антибактериальное соединение, где не регистрируется формирование колоний, нами предложен метод культивирования агаровых блоков [27]. С этой целью из агаровой пластинки без видимого роста бактерий асептически вырезается фрагмент в месте нанесения инокулума, который переносится в стерильную жидкую питательную среду и культивируется при оптимальной температуре не менее 5 суток. Для визуализации роста в среду может быть добавлен стерильный раствор тетразолия (0,05 мг/мл) (рис. 5).



А



Б

Рис. 5. Перенос фрагмента агара ($0,022 \text{ см}^3$), содержащего антибиотик без видимого роста, в жидкую питательную среду (3 мл) (А) и результаты культивирования агаровых блоков в течение 5 суток (Б): 1 – отсутствие роста *M. smegmatis* mc^2 155 после культивирования агарового блока, содержащего 32 мкг/мл изониазида; 2 – рост бактерий *M. smegmatis* mc^2 155 через 5 суток культивирования агарового блока, содержащего 16 мкг/мл изониазида

Проведенные исследования констатируют, что отсутствие роста на поверхности агаризованной среды не всегда означает бактерицидную активность, а предложенный нами способ позволяет выявить бактерии, находящиеся в покое в состоянии в присутствии антибиотика.

Ингибирование адгезии бактерий на твердой поверхности, формирования биопленок и действие антибактериальных соединений на зрелые биопленки

Изучение новых соединений с выраженной антибактериальной активностью может быть продолжено применительно к бактериальным биопленкам. Биопленка представляет собой сложную структуру, состоящую из микробных сообществ или агрегатов клеток одного или нескольких видов. Формирование и развитие биопленки включает четыре стадии: обратимая агрегация, необратимая адгезия, развитие и созревание биопленки, старение биопленки и рассеяние бактерий с последующим распространением на другие поверхности [28]. В соответствии с этапами образования биопленок изучают возмож-

ные способы их подавления. Один и тот же антимикробный агент может проявлять свою биологическую активность на разных стадиях развития биопленки. На примере антибактериальных пептидов показано интенсивное ингибирование бактериальной адгезии как чувствительных к пептидам бактерий, так и резистентных к ним. Предполагается, что пептиды изменяют поверхностный заряд и гидрофобность как бактерий, так и атакуемых ими поверхностей [29]. У чувствительных бактерий некоторые соединения нарушают целостность мембраны [17], что также может влиять на начальные этапы адгезии. Бактериальная адгезия и формирование биопленок на разных типах твердых поверхностей могут быть количественно оценены с помощью косвенных методов (окрашивание кристаллическим фиолетовым, солями тетразолия, флуоресцентными красителями или люминесценции АТФ). Прямое наблюдение действия антимикробных соединений на формирующуюся биопленку можно проводить с использованием различных современных методов микроскопии, например, атомно-силовой (рис. 6).

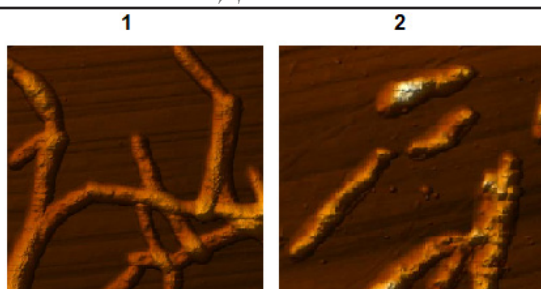


Рис. 6. Бактерии *M. smegmatis mc² 155* на поверхности полистирола через 24 ч инкубации в питательной среде (1) и в питательной среде с варнерином (2) (Атомно-силовая микроскопия, ACM Nano DST, Pacific Nanotechnology, USA)

Последующие стадии развития биопленки также могут быть ингибированы некоторыми антимикробными соединениями. Для изучения их действия на зрелую биопленку необходимо предварительно вырастить тест-бактерии в виде биопленки, на которую после отмывания нанести

раствор исследуемого соединения. По истечении периода инкубации биопленку вновь отмывают и оценивают общую биомассу, количество жизнеспособных клеток, а также архитектуру биопленки с помощью макроскопических методов (рис. 7).

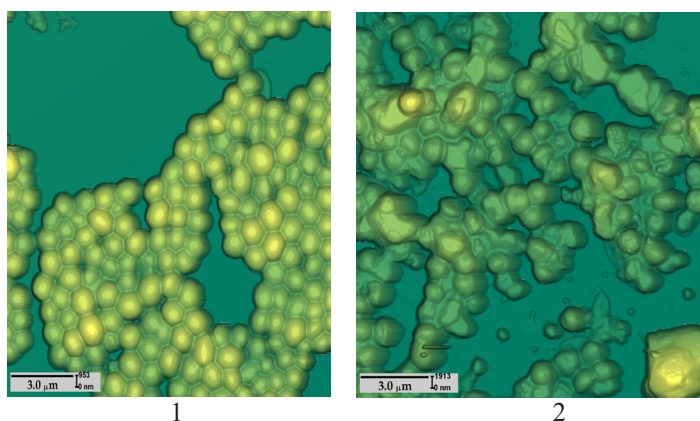


Рис. 7. Суточная биопленка *S. cohnii* BKM-3165 через 1 ч обработки 10 мМ Трис-НСl буфером (1) и буфером с варнерином (2) (Атомно-силовая микроскопия, ACM Nano DST, Pacific Nanotechnology, USA)

Полученные результаты сравнивают с контрольным образцом биопленки, с которым проводят аналогичные манипуляции, но без исследуемого соединения. Разрушение зрелых биопленок чувствительных бактерий после их обработки эффективными соединениями сопровождается не только снижением общей биомассы, но и бактерицидной активностью [30].

Изучение механизма действия антибактериальных соединений

Понимание механизма действия биологически активных соединений является основным требованием для открытия и

разработки новых лекарственных средств. Антибактериальные свойства новых соединений могут быть реализованы через различные и многообразные механизмы действия, которые важно установить. Антибактериальное действие может быть обусловлено генерированием свободных радикалов, нарушением синтеза пептидогликана и деления клеток [31], ингибированием синтеза ДНК и белка [32]. Эффекты соединений могут быть реализованы на уровне нарушения проницаемости мембран, активации лизиса, как в результате действия самого соединения, так и посредством активации аутолизина ата-

куемых бактерий [17]. Выводы о нарушении проницаемости мембран могут быть сделаны на основании обнаружения ионов калия или молекул АТФ в среде инкубации бактерий с исследуемым соединением [17]. Использование анализа биолюминесценции АТФ позволяет оценить уровень АТФ в тест-бактериях или в среде инкубации. Анализ биолюминесценции имеет широкий спектр применения, в том числе для оценки антибактериального действия [33]. Более масштабные нарушения мембраны атакованных клеток способствуют выходу макромолекул, таких как ДНК и РНК, которые можно обнаружить в среде с использованием спектрофотометрических или флуоресцентных методов. Активация лизиса бактерий-мишеней под действием исследуемых соединений может быть обнаружена по изменению мутности бактериальной суспензии, а также с помощью энзимогаммы аутолизисов бактерий. С этой целью полученные лизаты тест-бактерий отделяют от клеточных компонентов и подвергают ренатурируемому электрофорезу в полиакриламидном геле, содержащем убитые кипячением тест-бактерии или клетки *Micrococcus luteus*. После проявления энзимогамм регистрируют прозрачные зоны лизиса на фоне окрашенных иммобилизованных в гель клеток [34].

Так, при анализе лизатов *S. cohnii* ВКМ-3165, полученных под действием антимикробного пептида варнерина и детергента тритона X-100, показано электрофоретическое разделение белков, обладающих пептидогликангидролазной активностью. Наибольшее разнообразие аутолизисов было обнаружено в лизате, полученном при действии варнерина (рис. 8).

Для выяснения механизмов АБА также используют метод построения кривых «время–убийство» (time-kill), который является наиболее подходящим методом определения бактерицидного или фунги-

цидного эффекта. Он представляет собой мощный инструмент для получения информации о динамическом взаимодействии между антимикробным агентом и штаммом бактерий [35].

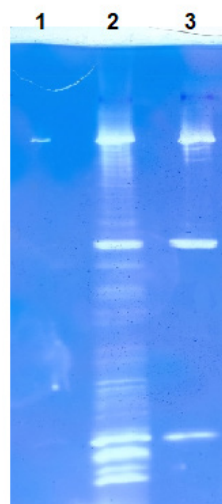


Рис. 8. Энзимогамма литических ферментов, обнаруженных в среде *S. cohnii* ВКМ-3165 через 1 ч инкубации в 10 мМ Трис-НСl буфере (1), в буфере в присутствии варнерина (2) и в буфере с 0,1 % тритоном X-100 (3)

Проточная цитометрия также может быть использована для тестирования восприимчивости микроорганизмов [36]. Быстрое обнаружение поврежденных клеток с помощью этого подхода зависит от использования соответствующих красителей.

Таким образом, при наличии соответствующей материально-технической базы можно оценить механизмы антибактериального действия соединений на примере наиболее чувствительного штамма.

Усиление антимикробных свойств новых соединений

При выявлении антимикробной активности в линейке новых соединений обычно выбирают вещества-лидеры, для которых показаны наиболее низкие значения МИК, сопоставимые со значениями клинически значимых антибиотиков. Однако антибактериальные эффекты соединений, действу-

ющих при более высоких концентрациях, могут быть значительно усилены применением адьювантных веществ. Так, антибактериальные эффекты лантибиотиков варнерина, хоминина и низина на грамотрицательные бактерии реализуются в присутствии субингибиторных количеств антибиотиков полимиксинового ряда [37], а также в гиперосмотических условиях [38].

Синергия между антимикробными препаратами основана на принципах повышения эффективности, снижения токсичности, увеличения биодоступности. Комбинированные антимикробные препараты на основе новых природных и синтетических соединений являются приоритетным направлением исследований [39]. Для изучения синергии соединений используют разные методы *in vitro*. Основным методом является анализ «шахматной доски» с последующим изоболограммным анализом [40] и анализом дозовых матриц [41].

Для повышения эффективности антибактериальных соединений необходимо изучить способы, которые улучшают их диффузию и нарушают мембранный барьер, отвечающий за общую устойчивость бактерий. Усиление антимикробного действия соединений может быть

потенцировано физическими воздействиями, такими как температура, ультразвук, различные диапазоны света [42, 43].

Заключение

В связи с растущей проблемой устойчивости к антибиотикам остро стоит вопрос поиска новых антибактериальных соединений. С этой целью скрининг огромного количества природных и синтетических соединений является первоочередной задачей. Важно понимать, что структура потенциального антимикробного агента определяет его функцию. Размер молекулы, состав заместителей или аминокислотных остатков в пептидах, заряд, конформация, спиральность, гидрофобность и амфифильность определяют антимикробную активность. Однако научная проблема «какая структура обуславливает биологическую активность» всё ещё требует постоянного изучения.

В заключение следует отметить, что данный обзор отразил лишь незначительную долю известных методов исследования антимикробной активности. В то же время результаты, получаемые с применением указанных подходов, могут способствовать решению глобальной проблемы устойчивости к антибиотикам.

Библиографический список

1. Cedeno-Munoz J.S., Aransiola S.A., Reddy K.V., Ranjit P., Victor-Ekwebelem M.O., Oyedele O.J., Perez-Almeida I.B., Maddela N.R., Rodriguez-Diaz J.M. Antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes as contaminants of emerging concern: Occurrences, impacts, mitigations and future guidelines // *Sci Total Environ*. 2024. – Vol. 20. – № 952. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175906.
2. Reuben R.C., Torres C. Bacteriocins: potentials and prospects in health and agrifood systems // *Arch Microbiol*. – 2024. – Vol. 206. – № 5. – P. 233. doi: 10.1007/s00203-024-03948-y.
3. Durand G.A., Raoult D., Dubourg G. Antibiotic discovery: history, methods and perspectives // *Int J Antimicrob Agents*. – 2019. – Vol. 53. – № 4. – P. 371-382. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2018.11.010
4. Полодова Т.В., Лемкина Л.М., Антипова М.В., Есаев А.Л., Коробов В.П. Распространенность феномена продукции пептидных факторов антагонизма среди коагулазонегативных стафилококков // *Микробиология*. – 2024. – Т. 93. – № 6. – С. 797-806. – doi: 10.31857/S0026365624060109.
5. Hourigan D., Miceli de Farias F., O'Connor P.M., Hill C., Ross R.P. Discovery and synthesis of leaderless bacteriocins from the Actinomycetota // *J Bacteriol*. – 2024. – Vol. 206. – № 11. doi: 10.1128/jb.00298-24.
6. Field D., Fernandez de Ullivarri M., Ross R.P., Hill C. After a century of nisin research - where are we now? // *FEMS Microbiol Rev*. – 2023. – Vol. 47. – № 3. doi: 10.1093/femsre/fuad023.

7. Kowalczyk P., Kaczynska K., Kleczkowska P., Bukowska-Osko I., Kramkowski K., Sulejczak D. The Lactoferrin Phenomenon-A Miracle Molecule // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – № 9. – P. 2941. doi: 10.3390/molecules2709294.
8. Юнникова Л.П., Акентьева Т.А., Суворова Ю.В., Данилова Е.А., Исляйкин М.К. Тропилированные 2-аминопиримидины. Особенности строения и биологическая активность // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2022. – Т. 65. – № 7. – С. 35-44. doi: 10.6060/ivkkt.20226507.6562.
9. Frolov N.A., Seferyan M.A., Valeev A.B., Saverina E.A., Detusheva E.V., Vereshchagin A.N. The antimicrobial and antibiofilm potential of new water-soluble Tris-quaternary ammonium compounds // *Int J Mol Sci*. – 2023 – Vol. 24. – № 13. – P. 10512. doi: 10.3390/ijms241310512.
10. Fischbach M.A., Walsh C.T. Antibiotics for emerging pathogens // *Science* –2009. – Vol. 325. – № 5944. – P. 1089-1093. doi:10.1126/science.1176667.
11. Zarrini G., Delgosha Z.B., Moghaddam K.M., Shahverdi A.R. Post-antibacterial effect of thymol // *Pharmaceutical Biology* – 2010. – Vol. 48. – № 6. – P. 633-636. doi: 10.3109/13880200903229098.
12. Voparai J.K., Sharma P.K. Mini Review on Antimicrobial Peptides, Sources, Mechanism and Recent Applications // *Protein Pept Lett*. – 2020. – Vol. 27. – № 1. – P. 4-16. doi: 10.2174/0929866526666190822165812.
13. Hart E.M, Bernhardt T.G. The mycomembrane // *Curr Biol*. – 2025. – Vol. 35. – № 3. – P. 85-86. doi: 0.1016/j.cub.2024.11.002.
14. Tang Z, Tan Y, Chen H, Wan Y. Benzoxazine: A Privileged Scaffold in Medicinal Chemistry // *Curr Med Chem*. – 2023. – Vol. 30. – № 4. – P. 372-389. doi: 10.2174/0929867329666220705140846.
15. Ndjoubi K.O., Sharma R., Hussein A.A. The Potential of Natural Diterpenes Against Tuberculosis // An Updated Review. *Curr Pharm Des*. – 2020. – Vol. 26. – № 24. – P. 2909-2932. doi: 10.2174/1381612826666200612163326.
16. Ковалевская В.С., Молодкина Н.Р., Тимофеев Т.И. Антагонистические свойства пробиотических штаммов молочнокислых бактерий // *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»* – 2016. – № 14. – С. 785-791.
17. Коробов В.П., Лемкина Л.М., Полюдова Т.В. Механизм антибактериального действия лантибиотика варнерина // *Микробиология* – 2022. – Т. 91. № 2. – С. 217-225. – doi: 10.31857/S0026365622020070.
18. Clinical and laboratory standards institute (CLSI). Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing; Seventeenth Informational Supplement. M100-S17. Wayne, PA, 2007.
19. Штильман М.И., Подкорытова А.В., Немцев С.В. [и др.]. Технология полимеров медико-биологического назначения. Полимеры природного происхождения. – Москва: ООО «Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2015. – 328 с. – (Учебник для высшей школы). – ISBN 978-5-9963-1564-2.
20. Смирнова Т.Г., Ларионова Е.Е., Андреевская С.Н., Севастьянова Э.В., Черноусова Л.Н. Тесты лекарственной чувствительности микобактерий. Часть 2. Метод пропорций на плотных питательных средах // *Вестник Центрального научно-исследовательского института туберкулеза*. – 2021. – № 3. – С. 79-90. doi: 10.7868/S2587667821030092.
21. Калинина А.А., Македошин А.С., Гурский Н.В., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф. Кинетическое исследование восстановления иоднитротетразолия хлорида суспензией в физиологическом растворе грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*. // *Теоретическая и прикладная экология* – 2018. №1. С. 25-32.
22. Скала Л.З., Сидоренко С.В., Нехорошева А.Г. [и др.]. Практические аспекты современной клинической микробиологии. - Москва, 2004. – 310 с.
23. Полюдова Т.В., Лемкина Л.М., Лихацкая Г.Н., Коробов В.П. Оптимизация условий получения и моделирование 3D-структуры нового антибактериального пептида семейства лантибиотиков // *Прикладная биохимия и микробиология* – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 47-54. – DOI 10.7868/S0555109917010147.
24. Hernandez C., Coppede J.S., Bertoni B.W., França S.C., Pereira A.M.S. Flash microbiocide: a rapid and economic method for determination of MBC and MFC // *Am J Plant Sci* – 2013. – № 4. – P. 850–852. doi: 10.4236/ajps.2013.44104.

25. Menon T., Umamaheswari K., Kumarasamy N., Solomon S., Thyagarajan S.P. Efficacy of fluconazole and itraconazole in the treatment of oral candidiasis in HIV patients // *Acta Tropica*. – 2001. – Vol. 80. – № 2. – P. 151-154. doi: 10.1016/S0001-706X(01)00170-X. ISSN 0001-706X
26. Andryukov B.G., Somova L.M., Timchenko N.F., Vynina M.P., Lyapun I.N. Toxin-antitoxin systems and their role in maintaining the pathogenic potential of causative agents of sapronoses // *Infect Disord Drug Targets*. – 2020. – Vol. 20. – № 5. – P. 570-584. doi: 10.2174/1871526519666190715150444.
27. Eroshenko D.V., Polyudova T.V., Pyankova A.A. VapBC and MazEF toxin/antitoxin systems in the regulation of biofilm formation and antibiotic tolerance in nontuberculous mycobacteria // *Int J Mycobacteriol*. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 156-166. doi: 10.4103/ijmy.ijmy_61_20.
28. Rather M.A., Gupta K., Mandal M. Microbial biofilm: formation, architecture, antibiotic resistance, and control strategies // *Braz J Microbiol*. – 2021. – Vol. 52. – №4. – P. 1701-1718. doi: 10.1007/s42770-021-00624-x.
29. Balouiri M., Sadiki M., Ibsouda S.K. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity // A review. *J Pharm Anal*. – 2016. – Vol. 6. – № 2. – P.71-79. doi: 10.1016/j.jpha.2015.11.005.
30. Полюдова Т.В., Полушкина А.В., Ерошенко Д.В., Коробов В.П. Антибактериальные эффекты стафилококцинов на биопленки *Mycobacterium smegmatis* mc2 155 // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2018. – № 3. – С. 6.
31. Bugg T.D.H., Kerr R.V. Mechanism of action of nucleoside antibacterial natural product antibiotics // *J Antibiot (Tokyo)* – 2019. – Vol. 72. – №12. – P. 865-876. doi: 10.1038/s41429-019-0227-3.
32. Alexander J.L., Thompson Z., Cowan J.A. Antimicrobial metallopeptides // *ACS Chem Biol*. – 2018. – Vol. 13. – №4. – P. 844-853. doi: 10.1021/acscchembio.7b00989.
33. Finger S., Wiegand C., Buschmann H.J. Antibacterial properties of cyclodextrin–antiseptics–complexes determined by microplate laser nephelometry and ATP bioluminescence assay // *Int. J. Pharm.* – 2013. – Vol. 452. – № 1-2. – P. 188-193. doi: 10.1016/j.ijpharm.2013.04.080.
34. Коробов В.П., Полюдова Т.В., Филатова Л.Б. и др. Активация аутолитической активности бактерий *Staphylococcus epidermidis* 33 низкомолекулярным катионным пептидом варнерином // *Микробиология*. – 2010. – Т. 79. – № 1. – С. 133-135.
35. Techaoei S. Time-kill kinetics and antimicrobial activities of Thai medical plant extracts against fish pathogenic bacteria // *J Adv Pharm Technol Res*. – 2022. – Vol.13. – № 1. –P. 25-29. doi: 10.4103/japtr.japtr_241_21.
36. Paparella A., Taccogna L., Aguzzi I. Flow cytometric assessment of the antimicrobial activity of essential oils against *Listeria monocytogenes*. // *Food Control*. – 2008. – № 19. – P. 1174-1182.
37. Polyudova T., Lemkina L., Eroshenko D., Esaev A. Suppression of planktonic and biofilm of *Escherichia coli* by the synergistic lantibiotics–polymyxins combinations // *Archives of Microbiology*. – 2024. – Vol. 206, No. 4. – P. 191. doi: 10.1007/s00203-024-03922-8.
38. Polyudova T.V., Eroshenko D.V., Korobov V.P. The effect of sucrose-induced osmotic stress on the sensitivity of *Escherichia coli* to bacteriocins // *Canadian Journal of Microbiology*. – 2019. – Vol. 65. – № 12. – P. 895-903. doi: 10.1139/cjm-2019-0292.
39. van Vuuren S, Viljoen A. Plant-based antimicrobial studies-methods and approaches to study the interaction between natural products // *Planta Med*. – 2011. – Vol. 77. – № 11. – P. 1168-82. doi: 10.1055/s-0030-1250736.
40. Кононова Л.И., Пьянков И.А., Смоляк А.А. и др. Синергидное действие катионного пептида хоминина и нового дезинфектанта на основе изохинолина на образование биоплёнок полирезистентных стафилококков // *Антибиотики и химиотерапия*. – 2020. – Т. 65. – № 5-6. – С. 11-18. – DOI 10.37489/0235-2990-2020-65-5-6-11-18.
41. Ianevski A., Giri A.K., Aittokallio T. SynergyFinder 2.0: visual analytics of multi-drug combination synergies // *Nucleic acids research* – 2020. – Vol. 48. – № 1. – P. 488-493. doi: 10.1093/nar/gkaa216.
42. Zhang M., Song Y., Wang J., Shi X., Chen Q., Ding R., Mou J., Fang H., Zhou Y., Chen R. Enhancement effect of static magnetic field on bactericidal activity // *Small*. – 2025. – Vol. 21. – № 18. doi: 10.1002/smll.202412334.
43. Yang X., Rai R., Huu C.N., Nitin N. Synergistic antimicrobial activity by light or thermal treatment and lauric arginate: membrane damage and oxidative stress // *Appl Environ Microbiol*. – 2019. – Vol. 85. – № 17. doi: 10.1128/AEM.01033-19.

REVIEW OF APPROACHES TO DETERMINING THE ANTIBACTERIAL ACTIVITY
OF NEW NATURAL AND SYNTHETIC COMPOUNDS

Polyudova T.V.¹, Antipyeva M.V.¹, Lobanov A.N.¹, Eroshenko D.V.^{1,2}

¹*Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS*

²*Institute of Technical Chemistry UB RAS*

For citation:

Polyudova T.V., Antipyeva M.V., Lobanov A.N., Eroshenko D.V. Review of approaches to determining the antibacterial activity of new natural and synthetic compounds // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 36–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.3>

The rapidly growing threat of microbial resistance has driven increased interest in the research and development of new antimicrobial agents from various sources. Consequently, increasing attention is being paid to methods for screening and assessing antimicrobial activity. Some testing methods, such as disk diffusion, agar well diffusion, and broth dilution, are well-known and widely used. However, methods for assessing antibiofilm activity and identifying and inhibiting dormant forms have not been widely adopted. Methods such as flow cytometry, fluorescence, and bioluminescence provide rapid results for assessing the activity of antimicrobial compounds and understanding their impact on cell viability and damage, but require specialized equipment and subsequent assessment of the reproducibility and standardization. This article provides an overview of bacterial susceptibility testing methods used to analyze new compounds with antibacterial potential. It presents widely known and laboratory-developed methods for detecting antibacterial activity. These include methods for identifying antagonist strains that produce antimicrobial compounds, quantitative assessment of antibacterial activity, identification of dormant forms of bacteria, inhibition of bacterial adhesion on a solid surface, the effect of antibacterial compounds on the biofilm formation and the destruction of mature biofilms, and studying the mechanism of action, as well as enhancing antimicrobial properties.

Keywords: antibacterial activity, antibacterial compounds, minimum inhibitory concentration, biofilm, dormant form.

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

Антипьева Марина Владимировна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: girmar@mail.ru

Лобанов Александр Николаевич, инженер, аспирант, «ИЭГМ УрО РАН»; e-mail: lobanov.aleksandr.n@gmail.com

Ерошенко Дарья Владимировна, кандидат биологических наук, инженер «ИЭГМ УрО РАН», научный сотрудник, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 3; e-mail: dasha.eroshenko@gmail.com

Материал поступил в редакцию 14.10.2025

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ К-МГ РУД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИНИ-КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА*

Д.Г. Шишков, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

К.Н. Корляков, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Т.Н. Лисина, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

В.Р. Ямалтдинова, *Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства*

Для цитирования:

Шишков Д.Г., Корляков К.Н., Лисина Т.Н., Ямалтдинова В.Р. Использование побочных продуктов животноводства и переработки К-Мг руд для получения мини-клубней картофеля в условиях защищенного грунта // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 49–61. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.4>

В статье рассматривается использование побочных продуктов животноводства (сухой куриный помёт) и переработки К-Мг руд (шламов) для получения мини-клубней картофеля в условиях защищённого грунта. Изучено изменение агрохимических показателей субстрата (торфа верхового), содержание микроэлементов в листьях картофеля и продуктивность мини-клубней картофеля сортов Джулия и Гранд в зависимости от доз и соотношений побочных продуктов. Более высокая скорость потребления элементов питания из субстрата привела к снижению агрохимических показателей плодородия торфа при возделывании раннего сорта Джулия относительно среднеспелого сорта Гранд на 45 сутки после посадки. Применение шламов привело к увеличению концентрации водорастворимых солей и содержания хлоридов в торфе на 2,6 г/л и 0,32 % соответственно ($НСР_{05} = 0,6$ г/л и 0,12 % соответственно). Наибольшее содержание подвижных форм фосфора и калия, а также нитратного азота получено при совместном внесении шламов и сухого помёта. Общая масса мини-клубней на сорте Гранд составила 156,1 г, на сорте Джулия – 144,5 г (разница 11,6 г при $НСР_{05} = 9,7$ г). Среднее количество сформированных мини-клубней составило 8,6 шт. на сорте Джулия и 7,1 шт. на сорте Гранд ($НСР_{05} = 1,2$ шт). Наибольшее влияние на общую массу и количество мини-клубней оказало применение шламов. Определение содержания микроэлементов в листьях картофеля обнаружило наличие сложных закономерностей распределения по вариантам опыта. Установлены достоверные обратные тесные корреляционные связи между массой

* Работа выполнена в рамках КПНИ «Развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации», номер государственной регистрации темы 123092100019-4.

мини-клубней и содержанием кобальта ($r=-0,82$) а также количеством мини-клубней и содержанием молибдена ($r=-0,72$). Негативного влияния повышения концентрации хлоридов в торфе на продуктивность мини-клубней не установлено.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), меристемные растения, мини-клубни, шламы, сухой куриный помёт, микроэлементы.

Введение

Работы по повышению объемов производства и получению здорового семенного картофеля не теряют своей актуальности, так как картофель является важной продовольственной культурой в России [1, 2]. Получить здоровый семенной картофель возможно за счёт культивирования *in vitro* апикальных меристем пророщенных клубней картофеля до состояния микрорастений, с дальнейшим индуцированием клубнеобразования в условиях защищенного грунта [3, 4]. Данный способ препятствует контакту семенного материала с насекомыми, которые являются переносчиками возбудителей вирусных и бактериальных заболеваний [5]. При пересадке в грунт оздоровленные меристемные растения картофеля испытывают стресс, который может привести к задержке роста, а в дальнейшем и к гибели растения. Поэтому важно разработать приемы, обеспечивающие оптимальные условия для развития растений после пересадки [4]. В практике размножения семенного картофеля в защищенном грунте обычно используются подкормки водорастворимыми удобрениями [6].

При выращивании растений картофеля в условиях защищенного грунта регулярный капельный полив приводит к вымыванию водорастворимых удобрений. Побочные продукты переработки промышленности, в свою очередь, обладают пролонгированным действием и могут обеспечить растение необходимыми элементами питания в течении всего срока вегетации [7-9].

В «Пермском НИИСХ» – филиале ПФИЦ УрО РАН – проведены комплекс-

ные исследования по влиянию как переработанных, так и не переработанных глинисто-солевых шламов (побочных продуктов переработки К-Mg руд) на продуктивность картофеля в условиях открытого грунта [7, 10].

Таким образом, целью исследований была оценка эффективности применения побочных продуктов переработки К-Mg руд и животноводства для получения мини-клубней картофеля в условиях защищенного грунта.

Научная новизна исследований заключается в том, что впервые в условиях защищенного грунта изучено применение различных доз и соотношений шламов и куриного помёта как пролонгированного удобрения без использования подкормок водорастворимыми удобрениями в течении вегетации меристемных растений картофеля.

Материалы и методы исследований

Исследования проведены в 2025 году в условиях защищенного грунта в теплице «Пермского НИИСХ». Общая схема опыта состоит из 16 вариантов с четырьмя дозами (включая «нулевую») шлама (продукта переработки К-Mg руд) и сухого куриного помёта, а также их соотношениями между собой. В статье представлены данные по 5 основным вариантам опыта, на которых проводили более детальные исследования (условные обозначения 0, 1, 2, 3 – количество единичных доз):

1. Контроль (0.0)
2. Помёт 0,8 г/сосуд (0.2)
3. Шлам 2 г/сосуд (2.0)

4. Шлам 2 г/сосуд + Помёт 0,8 г/сосуд (2.2)

5. Шлам 4 г/сосуд + Помёт 1,2 г/сосуд (3.3)

Первая цифра в условном обозначении указывает на количество единичных доз шлама, вторая цифра – единичных доз сухого куриного помёта. В случае отсутствия какого-либо из компонентов на его месте в условном обозначении указывается «0».

Дозы шлама рассчитаны на основании предварительных исследований по содер-

жанию хлора в субстрате при различном соотношении субстрата и шлама. Дозы составили 2 и 4 г/сосуд (эквивалентно применению 5 и 10 т/га в физическом весе шлама в условиях открытого грунта). Дозы сухого куриного помёта составили 0,8 и 1,2 г/сосуд (эквивалентно 2 и 3 т/га в физическом весе сухого помёта в условиях открытого грунта).

Субстрат – торф верховой. Агрохимическая характеристика субстрата, шламов и сухого куриного помёта представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Химический состав торфа и побочных продуктов, используемых в исследовании

Объект	pH _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	N-NO ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Органическое вещество
		мг/100 г торфа				%		
Торф	5,6	10,7	29,5	3,5	–	–	–	89,2
Шламы	7,0	–	–	–	0,35	0,70	8,75	5,9
Сухой куриный помёт	–	–	–	–	3,0	3,0	2,0	45,0

Побочные продукты, согласно схеме опыта, вносили в субстрат и компостиrowали в течении двух недель. Равномерность распределения по объёму торфа малых доз удобрений обеспечивали многократным перемешиванием субстрата после распределения удобрений. Затем компостиrowанный субстрат распределяли по сосудам, заполняя их на 2/3, и проводили посадку меристемных растений – 1 растение на сосуд. Через две недели сосуды заполняли субстратом до объёма 5 л, тем самым имитируя процесс «окучивания».

Для исследования были использованы меристемные растения, которые культивировали *in vitro* на агаризированной питательной среде Мурасиге-Скуга в химических пробирках Ф1,5*1,6 см с 5 мл питательной среды. Питательную среду стерилизовали автоклавированием при температуре 120°С в течение 22 минут

при давлении 1,0 атм. Затем растения помещали в климатический бокс и культивировали 28 суток при температуре 21-24°С и 16-часовом фотопериоде.

В опыте использовали меристемные растения двух сортов картофеля, различающихся по группе спелости: ранний сорт Джулия (селекция ООО «МАГ») и среднеспелый сорт Гранд (селекция ФИЦ им. Лорха). Повторность сосудов по варианту – 6-ти кратная.

Сопутствующие исследования проводили в аналитической лаборатории и Центре исследований и сертификации «Федерал» («Пермский НИИСХ» – филиал ПФИЦ УрО РАН). Анализ образцов торфа после компостиrowания на 45 сутки (в середине вегетации) после посадки и растительных образцов на содержание микроэлементов в листьях картофеля проводили в соответствии с установленными ГОСТами и ПНД. Массу и площадь одного листа

на 45 сутки после посадки определяли, отбирая 2-3 лист сверху с каждого растения в варианте (6 листов с варианта). Площадь листовой поверхности определяли с помощью программы «Areas» [11]. Количество и массу сформированных мини-клубней учитывали в соответствии с ГОСТ 33996-2016. Математическую обработку методом дисперсионного анализа проводили по Б.А. Доспехову [12].

Результаты

Агрохимическая характеристика торфа перед посадкой меристемных растений (через две недели после начала компостирования) представлена в табл. 2. Степень кислотности торфа снизилась относительно исходного торфа по всем вариантам опыта. При применении побочных продуктов pH_{KCl} увеличивался на 0,2-0,4 относительно контроля. Содержание подвижного фосфора достоверно увеличилось при совместном применении шлама с помётом в двойной и тройной дозах на 1,8-3,5 мг/100 г при $HCP_{05}=1,6$ мг/100 г. Содержание подвижного калия достоверно снизилось относительно контроля при приме-

нении побочных продуктов по отдельности на 1,8-1,6 мг/100 г ($HCP_{05}=1,6$ мг/100 г), при совместном их применении – наоборот увеличилось на 3,2-6,1 мг/100 г. Содержание нитратного азота увеличилось относительно контроля по всем вариантам с применением побочных продуктов на 14,4-20,1 мг/100 г без достоверной разницы между ними ($HCP_{05}=7,4$ мг/100 г). Концентрация водорастворимых солей (ЕС) и ионов хлора достоверно увеличилась относительно контроля при применении шлама в чистом виде на 1,9 г/л и 1,0 % соответственно ($HCP_{05}=1,7$ г/л и 1,0 % соответственно). При совместном внесении шлама и сухого помёта в двойной дозе величина показателей доказуемо не изменяется, при тройной – достоверное увеличение составило 2,1 г/л для ЕС и 1,9 % для Cl^- относительно варианта с внесением одного шлама в двойной дозе.

Для того, чтобы оценить обеспеченность торфа элементами минерального питания в период наибольшего их потребления растениями картофеля, отбирали образцы в середине вегетации на 45 суток после посадки.

Таблица 2.

Агрохимический состав торфа после компостирования перед посадкой меристемных растений

Вариант	pH_{KCl}	мг/100 г торфа			ЕС, г/л	Cl^- , %
		P_2O_5	K_2O	N- NO_3		
0.0	4,8	14,1	26,4	33,6	4,2	0,7
0.2	5,0	15,1	24,6	50,1	4,3	0,5
2.0	5,0	15,6	24,8	53,7	6,1	1,7
2.2	5,2	17,6	29,6	48,0	5,4	2,2
3.3	5,1	15,9	32,5	50,6	8,2	3,6
HCP_{05}	0,1	1,6	1,6	7,4	1,7	1,0

Содержание подвижного фосфора в торфе было достоверно ниже на раннем сорте Джулия, чем на среднеспелом сорте Гранд на 3,7 мг/100 г при $HCP_{05}=1,4$ мг/100 г (табл. 3). Среди доз и соотношений побочных продуктов достоверное увеличение отмечено при со-

вместном внесении шлама и сухого помёта в тройной дозе на 4,2 мг/100 г при $HCP_{05}=2,3$ мг/100 г. Аналогичная закономерность получена и отдельно по сортам: на сорте Джулия увеличение составило 4,2 мг/100 г, на сорте Гранд 4,1 мг/100 г при $HCP_{05}=3,2$ мг/100 г. Увеличение пока-

зателя на сорте Гранд относительно сорта Джулия отмечено также в вариантах 0.2 и 2.2 на 9,5 и 5,9 мг/100 г соответственно, что свидетельствует о влиянии на величину показателя в опыте сухого помёта.

Содержание подвижного калия в торфе на 45 сутки после посадки также было достоверно выше под среднеспелым сортом Гранд, чем под ранним сортом Джулия (на 14,4 мг/100 г при НСР₀₅=2,4 мг/100 г) (табл. 4). Под действием побочных про-

дуктов достоверное увеличение отмечено в вариантах 2.2 и 3.3 на 3,9 и 31,8 мг/100 г соответственно при НСР₀₅=3,9 мг/100 г. На увеличение содержания подвижного калия в почве наибольшее влияние оказало внесение сухого помёта, эффективность которого, тем не менее, проявилась в большей степени на сорте Гранд. Так, в варианте 0.2 увеличение составило 13,4 мг/100 г, в варианте 2.2 – 13,3 мг/100 г, в варианте 3.3 – 31,3 мг/100 г при НСР₀₅=5,5 мг/100 г.

Таблица 3.

Содержание подвижного фосфора в торфе на 45 сутки после посадки меристемных растений, мг/100 г

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	11,7	12,1	11,9	–
0.2	7,7	17,2	12,4	0,6
2.0	9,8	12,1	10,9	-1,0
2.2	8,8	14,7	11,8	-0,1
3.3	15,9	16,2	16,0	4,2
Среднее по фактору А	10,8	14,4	12,6	–
Отклонения	–	3,7	–	–
НСР ₀₅				
главных эффектов	фактора А		1,4	
	фактора В и взаимодействия АВ		2,3	
частных различий		3,2		

Таблица 4.

Содержание подвижного калия в торфе на 45 сутки после посадки меристемных растений, мг/100 г

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	32,7	37,7	35,2	–
0.2	23,0	51,1	37,0	1,9
2.0	32,7	43,5	38,1	2,9
2.2	27,1	51,0	39,0	3,9
3.3	64,9	69,0	67,0	31,8
Среднее по фактору А	36,0	50,4	43,2	–
Отклонения	–	14,4	–	–
НСР ₀₅				
главных эффектов	фактора А		2,4	
	фактора В и взаимодействия АВ		3,9	
частных различий		5,5		

Содержание нитратного азота в торфе увеличивалось на сорте Гранд на 34,4 мг/100 г относительно сорта Джулия при НСР₀₅=2,1 мг/100 г (табл. 5). Достоверное влияние на величину показателя оказали как шламы, так и сухой помёт,

увеличив содержание на 10,0-10,4 мг/100 г соответственно (НСР₀₅=3,4 мг/100 г). При совместном внесении шламов и сухого помёта в двойной дозе достоверного увеличения не установлено, как по каждому сорту отдельно, так и в среднем по

двум сортам. При совместном внесении побочных продуктов в тройной дозе получено наибольшее содержание нитратного азота в опыте.

Концентрация водорастворимых солей возрастала при применении всех исследуемых в опыте побочных продуктов на 0,6–3,9 г/л ($НСП_{05}=0,6$ г/л) и увеличивалась при выращивании сорта Гранд относительно сорта Джулия на 1,5 г/л

($НСП_{05}=0,4$) (табл. 6). Увеличение показателя происходило за счёт внесения шлама: в варианте 2.0 увеличение составило 2,2 и 2,9 г/л при $НСП_{05}=0,9$ г/л по сортам Джулия и Гранд соответственно. Дополнительное внесение сухого помёта нивелировало данный эффект: в варианте 2.2 концентрация водорастворимых солей достоверно снижалась на 1,2–1,4 г/л относительно варианта 2.0.

Таблица 5.

Содержание нитратного азота в торфе на 45 сутки после посадки меристемных растений, мг/100 г торфа

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	21,9	53,7	37,8	–
0.2	30,2	65,4	47,8	10,0
2.0	26,4	70,0	48,2	10,4
2.2	26,6	52,5	39,6	1,8
3.3	49,6	85,1	67,3	29,6
Среднее по фактору А	30,9	65,3	48,1	–
Отклонения	–	34,4	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А			2,1
	фактора В и взаимодействия АВ			3,4
частных различий				4,8

Таблица 6.

Концентрация водорастворимых солей в торфе на 45 сутки после посадки меристемных растений, г/л

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	2,3	3,8	3,1	–
0.2	3,0	4,3	3,6	0,6
2.0	4,5	6,7	5,6	2,6
2.2	3,3	5,3	4,3	1,2
3.3	6,5	7,3	6,9	3,9
Среднее по фактору А	3,9	5,5	4,7	–
Отклонения	–	1,5	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А			0,4
	фактора В и взаимодействия АВ			0,6
частных различий				0,9

Содержание хлора в торфе было выше на 0,56 % на сорте Гранд, чем на сорте Джулия ($НСП_{05}=0,07$ %) (табл. 7). Среди побочных продуктов основное влияние на увеличение показателя оказали шламы: в варианте 2.0 в среднем по всем сортам увеличение составило 0,32 % при $НСП_{05}=0,12$ %, в то время как в варианте

0.2 достоверного увеличения относительно контроля не установлено. Нивелирование негативного действия шламов при внесении сухого помёта, как это было показано для концентрации водорастворимых солей, для данного показателя не установлено. Необходимо отметить, что относительно исходной концентрации по-

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

сле компостирования содержание хлора снижается по всем вариантам опыта, за исключением варианта 3.3 на сорте Гранд. Снижение концентрации может быть объяснено вымыванием хлоридов при капельном поливе торфа. Различия между сортами могут быть объяснены разными группами спелости изучаемых сортов и различиями в динамике потребления ими элементов питания.

Необходимо отметить, что на 45 суток после посадки относительно данных, полученных после двухнедельного компостирования, отмечается увеличение содержания элементов питания. Так, например, в варианте 3.3 отмечено увеличение содержания фосфора (на 0,1 мг/100 г), калия

(на 34,5 мг/100 г) и азота (на 16,7 мг/100 г). Данная закономерность объясняется тем, что из изучаемых в опыте удобрений элементы питания высвобождаются постепенно (продолжительное действие) и к середине вегетации меристемных растений картофеля данный процесс продолжается.

Развитие растений на 45 сутки после посадки зависело от сорта и применяемых в опыте побочных продуктов (табл. 8). Средняя масса одного листа у сорта Гранд была выше на 0,84 г, чем у сорта Джулия при $НСП_{05}=0,49$ г. При совместном внесении шлама и сухого помёта величина показателя возрастала на 1,12-2,03 г в среднем по обоим сортам при $НСП_{05}=0,77$ г.

Таблица 7.

Содержание Си-иона в торфе на 45 сутки после посадки меристемных растений, %

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	0,02	0,23	0,12	–
0.2	0,02	0,06	0,04	-0,09
2.0	0,26	0,63	0,44	0,32
2.2	0,22	0,82	0,52	0,39
3.3	2,15	3,72	2,93	2,81
Среднее по фактору А	0,53	1,09	0,81	–
Отклонения	–	0,56	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А		0,07	
	фактора В и взаимодействия АВ		0,12	
частных различий			0,16	

Таблица 8.

Средняя масса одного листа на 45 сутки после посадки меристемных растений, г

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	3,66	4,43	4,04	–
0.2	3,99	4,67	4,33	0,29
2.0	4,64	4,91	4,77	0,73
2.2	4,60	5,72	5,16	1,12
3.3	5,39	6,76	6,07	2,03
Среднее по фактору А	4,45	5,30	4,87	–
Отклонения	–	0,84	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А		0,49	
	фактора В и взаимодействия АВ		0,77	
частных различий			1,09	

Аналогичная закономерность отмечена при определении площади листовой поверхности (рис. 1). В контроле и при внесении побочных продуктов в чистом виде величина показателя изменялась в узком диапазоне от 75,8 до 96,7 см²/лист. При совместном внесении шлама и сухого помёта отмечено увеличение площади на 27-35% относительно раздельного применения по сортам Джулия и Гранд соответственно.

Для площади листовой поверхности и средней массы одного листа на 45 сутки

после посадки меристемных растений отмечены следующие корреляционные связи с агрохимическими показателями почвы в данный период (достоверны при N=10 и p<0,05):

1. С содержанием подвижного калия в почве – 0,93 и 0,84 (положительная очень сильная и сильная связь);
2. С концентрацией водорастворимых солей – 0,84 и 0,88 (положительная сильная связь);
3. С содержанием хлора – 0,89 и 0,88 (положительная сильная связь).

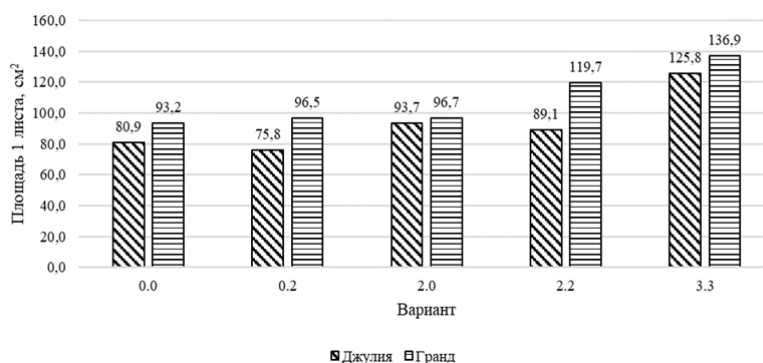


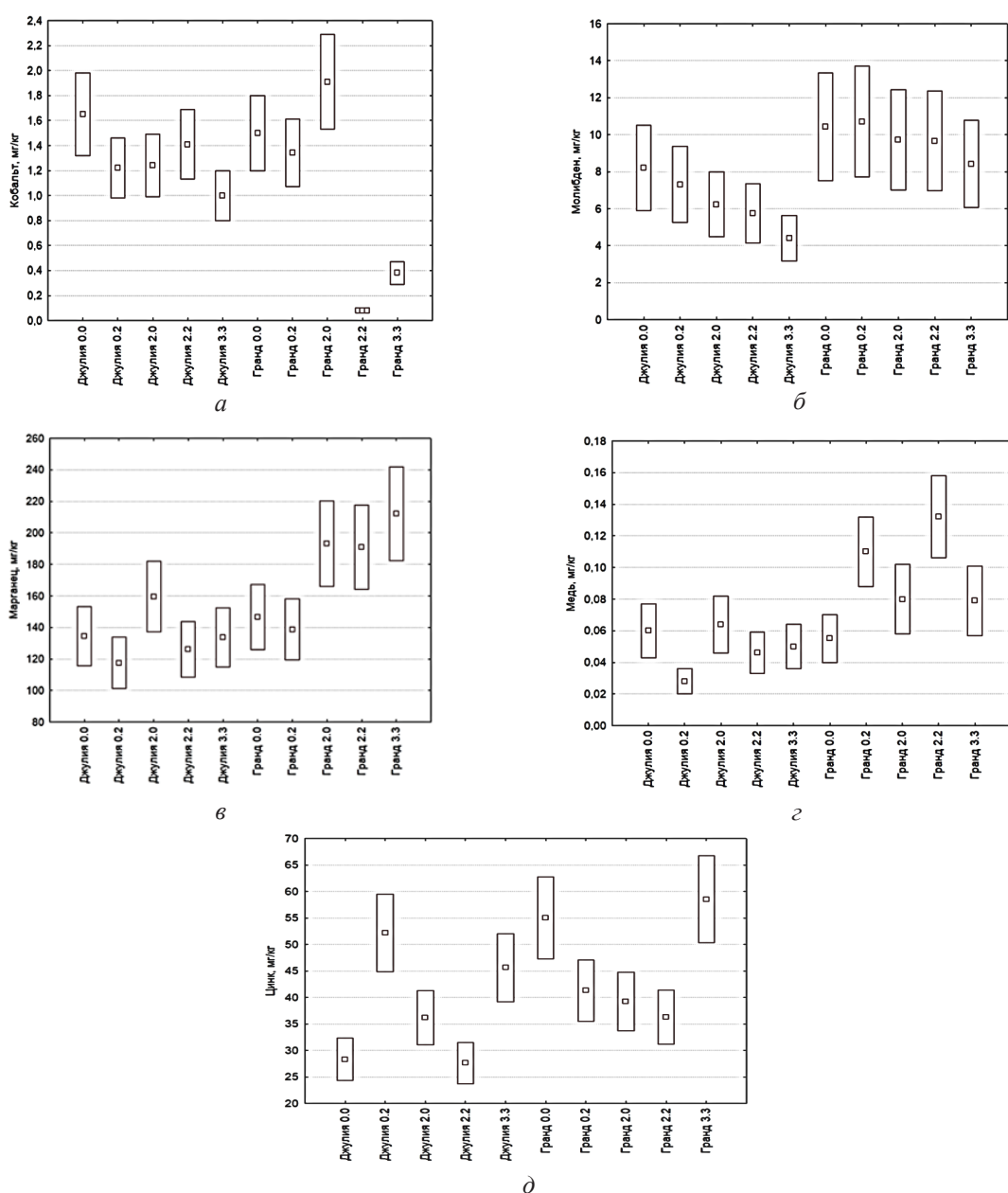
Рис. 1. Площадь листовой поверхности одного листа на 45 сутки после посадки меристемных растений, см²/лист

Закономерности, описанные выше, могут быть связаны с тем, что стрессовые условия, которыми являются повышение концентрации водорастворимых солей и хлора в субстрате, вызывают ответную реакцию растения в виде увеличения надземной массы.

Кроме пролонгированного действия в качестве комплексного удобрения, шламы характеризуются наличием ряда микроэлементов [6]. Поэтому в листьях был проведён анализ на содержание основных микроэлементов. Содержание кобальта варьировало от 1,0 до 1,9 мг/кг, в вариантах 2.2 и 3.3 на сорте Гранд содержание составило 0,08 и 0,38 соответственно (рис. 2а). На сорте Джулия отмечена тенденция снижения содержания элемента относительно контроля, в варианте 3.3 снижение достоверное.

Содержание молибдена по вариантам опыта снижалось с увеличением доз побочных продуктов (рис. 2б). На сорте Джулия содержание снижалось с 8,2 мг/кг на контроле до 4,4 мг/кг в варианте 3.3 (разница математически доказуема). На сорте Гранд содержание элемента было в целом выше, но также снижалось от контроля (10,4 мг/кг) к варианту 3.3 (8,4 мг/кг).

Содержание марганца в листьях меристемных растений картофеля по сорту Джулия изменялось от 118 до 160 мг/кг, по сорту Гранд – от 139 до 2012 мг/кг, достоверно увеличиваясь в вариантах 2.0, 2.2 и 3.3 (рис. 2в). Содержание меди и цинка варьировало по вариантам опыта в диапазонах от 0,03 до 0,13 и от 27,6 до 58,5 мг/кг без видимых закономерностей (рис. 2г, 2д).



а – Содержание кобальта, б – содержание молибдена, в – содержание марганца, г – содержание меди, д – содержание цинка

□ – содержание элемента; □ – ± ошибка определения

Рис. 2. Содержание микроэлементов в листьях картофеля на 45 сутки после посадки, мг/кг

Показатели продуктивности меристемных растений картофеля, выращиваемых в условиях теплицы, включают в себя общую массу сформированных мини-клубней, их количество и среднюю массу мини-клубня.

Общая масса сформированных мини-клубней изменялась в опыте как в зависимости от сорта, так и от применяемых побочных продуктов (табл. 9). Величина показателя по среднеспелому сорту Гранд была достоверно выше массы, сформиро-

ванной растениями раннего сорта Джулия, на 11,6 г при $НСП_{05}=9,7$ г. При применении шламов и сухого помёта отмечена тенденция к увеличению общей массы мини-клубней на 14,9 и 5,3 г соот-

ветственно ($НСП_{05}=15,4$ г). Достоверное увеличение показателя отмечено при совместном использовании побочных продуктов на 25,4-28,1 г без достоверной разницы между дозами.

Таблица 9.

Общая масса сформированных мини-клубней, г

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	118,2	152,9	135,5	–
0.2	145,1	136,6	140,9	5,3
2.0	160,0	140,8	150,4	14,9
2.2	147,8	179,5	163,6	28,1
3.3	151,2	170,7	160,9	25,4
Среднее по фактору А	144,5	156,1	150,3	
Отклонения	–	11,6	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А			9,7
	фактора В и взаимодействия АВ			15,4
частных различий				21,7

Количественный выход сформированных мини-клубней имеет важнейшее значение с точки зрения производства оздоровленного семенного материала картофеля. Величина показателя в зависимости от сорта имела закономерность обратную той, что была получена для общей массы мини-клубней (табл. 10). Среднее количество мини-клубней по сорту Гранд снижалось относительно сорта Джулия на

1,5 шт при $НСП_{05}=1,2$ шт. Достоверное влияние на величину показателя оказали шламы и их совместное применение с сухим помётом: увеличение составило 2,3-2,7 шт при $НСП_{05}=1,9$ без достоверной разницы между вариантами. Наибольшее количество мини-клубней было сформировано в варианте 2.0 на сорте Джулия, достоверно увеличиваясь только относительно контроля на 4,3 шт при $НСП_{05}=2,8$ шт.

Таблица 10.

Среднее количество сформированных мини-клубней, шт

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	6,0	6,5	6,3	–
0.2	8,3	4,8	6,6	0,3
2.0	10,3	7,3	8,8	2,6
2.2	9,0	8,8	8,9	2,7
3.3	9,2	8,0	8,6	2,3
Среднее по фактору А	8,6	7,1	7,8	
Отклонения	–	-1,5	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А			1,2
	фактора В и взаимодействия АВ			1,9
частных различий				2,8

Средняя масса одного мини-клубня в целом по опыту изменялась от 16,0 до 31,5 г, достоверно увеличивалась по сорту Гранд на 6,3 г ($НСП_{05}=3,6$ г) и имела тенденцию к снижению при применении шламов в чистом виде и совместно с сухим куриным помётом (табл. 11).

Между показателями продуктивности картофеля и агрохимическими показателями на 45 сутки после посадки не установлено математически доказуемых корреляционных связей, что позволяет предположить,

что накопление хлора и водорастворимых солей в субстрате, которое происходит при применении побочных продуктов, не оказывает влияние на продуктивность меристемных растений. Вместе с тем, установлены достоверные корреляционные связи сильной тесноты общей массы мини-клубней с содержанием кобальта (-0,82); количества мини-клубней и средней массы 1 мини-клубня с содержанием молибдена (-0,72 и 0,82); общей массы мини-клубней со средней массой одного листа (0,77).

Таблица 11.

Средняя масса одного мини-клубня, г

Фактор В	Фактор А		среднее по фактору В	отклонения
	Джулия	Гранд		
0.0	20,7	25,0	22,9	–
0.2	18,5	31,5	25,0	2,2
2.0	16,0	23,2	19,6	-3,3
2.2	19,3	21,4	20,4	-2,5
3.3	17,4	22,3	19,8	-3,0
Среднее по фактору А	18,4	24,7	21,5	–
Отклонения	–	6,3	–	–
$НСП_{05}$				
главных эффектов	фактора А		3,6	
	фактора В и взаимодействия АВ		$F_{\phi} < F_{05}$	
частных различий		8,0		

Таким образом, использование побочных продуктов переработки К-Мг руд и животноводства оказало существенное влияние на условия получения мини-клубней картофеля сортов Джулия и Гранд в условиях защищённого грунта. Более высокая скорость потребления элементов питания из субстрата привела к снижению агрохимических показателей торфа на раннем сорте Джулия относительно среднеспелого сорта Гранд. Применение сухого помёта привело к увеличению содержания подвижного калия в торфе, применение шламов – к увеличению содержания хлоридов и концентрации водорастворимых солей на 45 сутки после посадки. Совместное применение шламов и сухого куриного помёта оказало влияние на увеличение содержания

подвижного фосфора и нитратного азота. Наибольшая масса листа в середине вегетации и общая масса мини-клубней получены на сорте Гранд, наибольшее количество мини-клубней получено на сорте Джулия. Из побочных продуктов наибольшее влияние на общую массу мини-клубней и количество мини-клубней оказало применение шламов. Содержание микроэлементов в листьях картофеля имело сложные закономерности распределения по вариантам опыта. Между массой мини-клубней и содержанием кобальта, а также количеством мини-клубней и содержанием молибдена установлена обратная сильная корреляционная связь. Негативного влияния повышения концентрации хлоридов в торфе на продуктивность мини-клубней не установлено.

Библиографический список

1. АБ-центр. Посевные площади картофеля в России в 2024 году, прогноз сборов [Электронный ресурс] – URL: <https://ab-centre.ru/news/posevnyue-ploschadi-kartofelya-v-rossii-v-2024-godu-prognoz-sborov> (дата обращения: 02.07.2025).
2. Индустрия картофеля / Е.А. Симаков [и др.]. – Москва: НПФ АгроНИР, 2013. – 272 с.
3. Цёма Л.Г., Латыпова А.Л. Производство оригинального, элитного и семенного картофеля в условиях Пермского края. – Пермь: «От и До», 2021. – 66 с.
4. Belguendouz A., Kaide Harche M., Benmahiou B. Evaluation of different culture media and activated charcoal supply on yield and quality of potato microtubers grown in vitro // Journal of Plant Nutrition. – 2021. – № 4. – P. 2123-2137. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1881545>
5. Зейрук В.Н., Белякова Н.А., Белов Г.Л., Васильева М.К., Деревягина М.К., Митина Г.В. Биологическая защита меристемного семенного картофеля от вредителей – переносчиков вирусов в закрытом грунте // Защита картофеля. – 2017. – № 4. – С. 3-11.
6. Молякко А.А., Марухленко А.В., Еренкова Л.А., Борисова Н.П., Абросимов Д.В. Влияние хелатных удобрений на урожайность мини-клубней картофеля в защищенном грунте // Аграрная наука. – 2018. – № 3. – С. 64-67.
7. Сметанников А.Ф., Корляков К.Н., Оносов Д.В., Цема Л.Г., Оносова Е.Ф., Шишков Д.Г., Васбиева М.Т., Сметанников Ал.Ф. Способ получения и возможности применения новых комплексных удобрений из флотационных шламов - отходов переработки калийно-магневых руд // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2024. – № 120. – С. 295-324. – <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-295-324>.
8. Веприкова Е.В., Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В. Получение биокомпозитных фосфор-калийных удобрений пролонгированного действия на основе коры лиственницы // Химия растительного сырья. – 2017. – №3. – С. 201-209. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031788>
9. Царева М.В. Влияние доз и способов внесения термически высушенного куриного помета на урожайность и качество картофеля // Агрехимический вестник. – 2022. – № 6. – С. 52-56. – <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-6-010>.
10. Шишков Д.Г., Сметанников А.Ф., Корляков К.Н., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р. Эффективность применения комплексной мелиорирующей добавки, созданной на основе побочных продуктов переработки К-Мг руд, при возделывании картофеля в Среднем Предуралье // Вестник Мичуринского государственного университета. – 2025. – № 1 (80). – С. 67-72. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-133-158>.
11. Пермяков А.Н., Дулов М.И., Васин В.Г., Толпекин А.А., Зуев Е.В. Методика определения площади листьев с помощью программы определения площади листьев «AreaS». – Самара: СамарГСХА, 2002. – 1 с.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Альянс, 2011. – 352 с.

THE USE OF BY-PRODUCTS OF ANIMAL HUSBANDRY AND K-MG ORE PROCESSING FOR POTATO MINI-TUBERS PRODUCTION IN A GREENHOUSE

Shishkov D.G., Korlyakov K.N., Lisina T.N., Yamaltdinova V.R.

Perm Agricultural Research Institute

For citation:

Shishkov D.G., Korlyakov K.N., Lisina T.N., Yamaltdinova V.R. The use of by-products of animal husbandry and K-Mg ore processing for potato mini-tubers production in a greenhouse // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 49–61. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.4>

The article discusses the use of by-products of processing K-Mg ores (sludge) and animal husbandry (dry chicken manure) for potato mini-tubers production in greenhouse conditions. The changes in the agrochemical parameters of the substrate (peat), the content of trace elements in potato leaves and the productivity of mini-tubers of the Julia and Grand potato varieties were studied depending on the doses and ratios of by-products. The higher rate of consumption of nutrients from the substrate led to degradation of peat agrochemical parameters for the early variety Julia relatively to the medium-ripened Grand variety on the 45th day after planting. The use of sludge led to increase of water-soluble salts concentration and chloride content in peat by 2.6 g/l and 0.32%, respectively (LSD₀₅=0.6 g/l and 0.12%, respectively). The highest content of mobile forms of phosphorus and potassium, as well as nitrate nitrogen, was obtained by the combined application of sludge and dry manure. The total mass of mini-tubers for the Grand variety was 156.1 g, for the Julia variety 144.5 g (the difference is 11.6 g with LSD₀₅=9.7 g). The average number of mini-tubers formed was 8.6 pieces per Julia variety and 7.1 pieces per Grand variety (LSD₀₅=1.2 pieces). The use of sludge had the greatest impact on the total weight and number of mini-tubers. The content of trace elements in potato leaves had complex patterns of distribution according to experimental variants. Reliable inverse correlations were established between the total mass of mini-tubers and Co content ($r=-0.82$), as well as between the quantity of mini-tubers and the Mo content ($r=-0.72$). No negative effect of increased chloride concentration in peat on the productivity of mini-tubers was observed.

Keywords: potatoes (Solanum tuberosum L.), meristem plants, mini-tubers, sludge, dry chicken manure, trace element.

Сведения об авторах

Шшиков Данил Глебович, научный сотрудник лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ПНИИСХ»), 614532, Пермский край, Пермский район, с. Лобаново, ул. Культуры, 12; e-mail: danil.schischkov@yandex.ru

Корляков Константин Николаевич, кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по науке, «ПНИИСХ»; e-mail: korlyakovkn@rambler.ru

Лисина Татьяна Николаевна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией агробиофотоники, «ПНИИСХ»; e-mail: atea2@yandex.ru

Ямалтдинова Венера Рафхатовна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, «ПНИИСХ»; e-mail: yamaltdinova2303@gmail.com

Материал поступил в редакцию 14.10.2025

ГЕТЕРОЦИКЛИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОФИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

А.А. Смоляк, *Институт технической химии УрО РАН*

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

Для цитирования:

Смоляк А.А., Шкляев Ю.В. Гетероциклизации некоторых непредельных соединений под действием электрофильных агентов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 62–73. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.5>

В обзоре рассмотрены вопросы образования азот-, кислород- и серосодержащих гетероциклов при взаимодействии непредельных соединений с электрофильными реагентами различной природы: галогенами, солями двухвалентной ртути и некоторыми другими.

Ключевые слова: *непредельные соединения, электрофильные реагенты, гетероциклизация.*

Циклизация – один из важнейших процессов в органической химии и живой природе. Практически все живые организмы содержат в себе карбо- или гетероциклы, а количество разнообразных лекарственных препаратов, содержащих карбо- или гетероциклы, составляет более 50% мирового производства. Механизмы циклизации/гетероциклизации весьма разнообразны – элиминирование атомов галогенов, конденсации по Дикману, Ружичке, циклообразование в реакциях Дильса – Альдера и т.д.

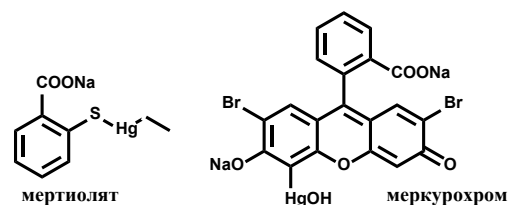
Одним из наиболее часто используемых реакций являются электрофильные реакции, к которым относятся реакции как электрофильного замещения в ароматическом (гетероциклическом) ряду, так и реакции циклообразования, исходя из подходящих линейных соединений.

Одним из привлекательных примеров электрофильных реакций являются гетероциклизации N-, O-, S-аллильных производных азинов и азолов с образованием мостиковых (узловых) гетероциклов, зачастую при этом атом азота несёт положительный заряд. Данные гетероциклизации достаточно легко осуществляются под действием сильных кислот, галогенов (Cl, Br, I), псевдогалогенов типа дородана, галогенидов и других солей переходных металлов, например, серебра, золота, меди, платины, родия, рутения, железа, ртути. Большое количество примеров взаимодействия солей ртути с непредельными соединениями описано в фундаментальной монографии А. Г. Макаровой и А. Н. Несмеянова [1], однако в данной монографии описаны взаимодействия солей ртути в подавляющем

объёме с линейными соединениями алифатического ряда, не приводящими к образованию гетероциклов. Кроме высокой стоимости вышеприведённых металлов, основной опасностью их применения в органическом синтезе является высокая токсичность, характерная для всех соединений тяжёлых металлов. Неудивительно поэтому, что большинство современных публикаций по реакциям, например, с участием соединений ртути, относятся не химии, а к токсикологии, в частности, обзор [2] содержит 219 ссылок на оригинальные статьи и цитируется в сети не менее 100 раз. Аналогичный случай находим также в источнике [3]. В то же время авторы [4] исследовали хелатные комплексы ртути с широким набором органических лигандов в качестве противомикробных агентов на примерах грам(+) и грам(-) бактерий, а также на грибах *C. albicans* и *A. niger* и показали, что данные комплексы обладают высокой противомикробной активностью. Многие соединения ртути с нуклеиновыми кислотами описаны в работе [5].

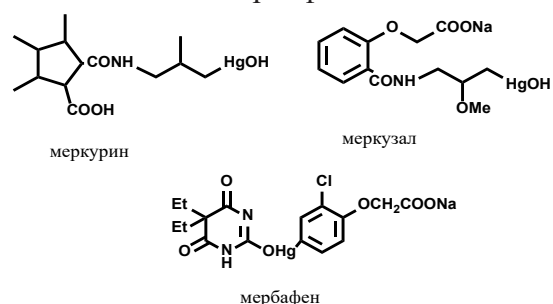
Следует также отметить, что большинство публикаций о (гетеро)циклизациях линейных соединений не содержит сведений о свойствах полученных соединений, содержащих тяжёлые металлы, поскольку металл удаляется сразу после прохождения циклизации в целевой каркас без выделения металлоорганического субстрата.

Анализ литературы показал, что органические препараты ртути, обладающие противомикробным действием, практически не востребованы как в исследовательской практике, так и в качестве дезинфицирующих препаратов. Исключение составляют меркурохром и мертиолят, которые используются для предотвращения микробного или грибкового загрязнения ряда вакцин.

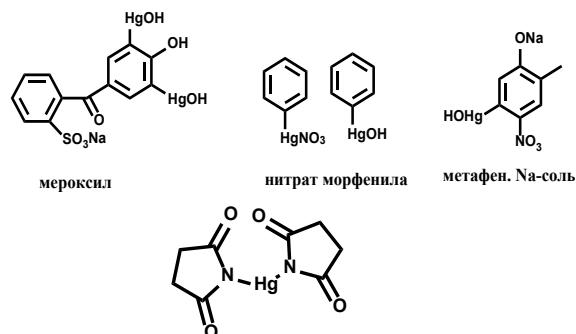


Согласно исследованию [6], в разное время применялись следующие препараты, содержащие ртуть:

Диуретики – Меркурин, Меркузал, Мербафен



Антисептики – Мертиолят, Метафен, Мероксил, нитрат морфенила, бис (2,5-диоксопирролидин-1-ил) ртуть

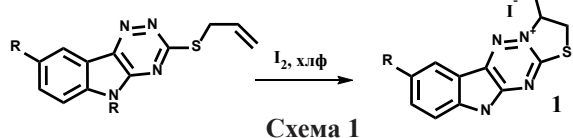


бис(2,5-диоксопирролидин-1-ил)ртуть

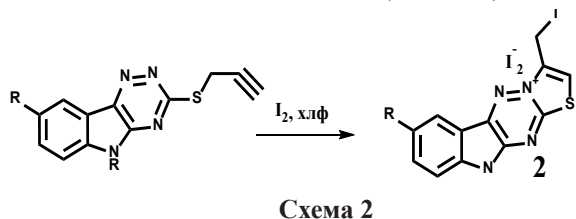
Галогенциклизации непредельных соединений

Как указано выше, гетероциклизации непредельных соединений могут идти под действием как галогенов, так и солей ртути. Подавляющее количество публикаций по гетероциклизации непредельных (аллильных, винильных и ацетиленовых) соединений относится к взаимодействию открытоцепных или (гетеро)циклических соединений с галогенами, в основном с бромом или йодом.

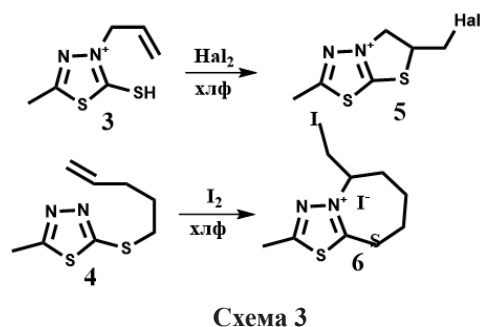
Так, при действии иода осуществлен синтез 3-иодметил-2,3-дигидро-10-R-[1,3]тиазоло[3',2':2,3][1,2,4]триазино[5,6-b]индолия **1** [7] (схема 1).



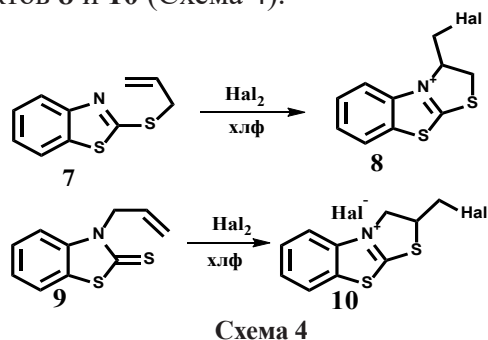
К аналогичным результатам приводит и галогенциклизация пропаргильных производных [8]. Полученный таким образом трииодид **2** проявил высокую активность против грибка *Trichophyton rubrum* в дозе 3.12 мкг/мл (схема 2).



Как и следовало ожидать, галогенциклизации N- или S-аллильных производных тиадиазолов **3**, **4** приводят к получению региоизомерных продуктов **5** и **6** [9] (схема 3).

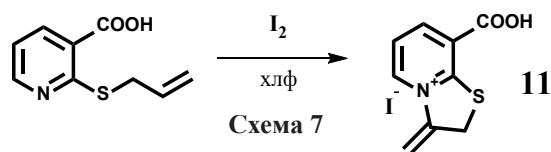


Аналогично ведут себя производные бензотиазола **7** и **9** с образованием продуктов **8** и **10** (Схема 4).

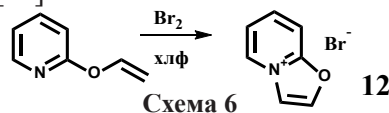


Интересно, что иодид 5-(иодметил)-2-метил-6,7-дигидро-5H-[1,3,4]тиадиазоло[2,3-b][1,3]тиаазиния **10** при концентрации 0.1 мкг/мл препятствует биоплёнокообразованию культур *B. Subtillis* и *K. Pneumonia* и снижает рост культуры *Candida 39*, а при концентрации 10 мкг/мл ингибирует биоплёнокообразование культур *Candida 39* и рост культуры *Staphilococcus* [9, см выше].

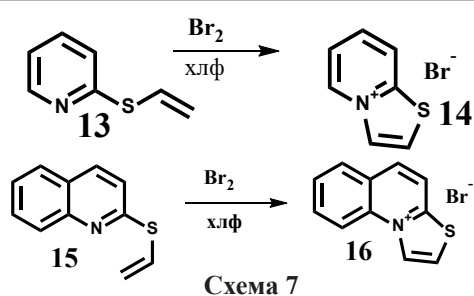
На противомикробную и противогрибковую активность испытан ряд соединений – иодид 8-карбокси-3-метилидено-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния, иодид 7-метилено-7,8-дигидро[1,3]тиазоло[2,3-і]пуриния и иодид 3-иодметил-8-карбокси-3-метил-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния [10]. Наиболее активным против *St. aureus*, *Candida albicans* и *Aspergillus niger* оказался иодид 8-карбокси-3-метилидено-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния **11** (схема 5), который в условиях испытаний показал 100%-ную активность против всех исследованных штаммов и, кроме того, подавлял биоплёнокообразование эффективнее клотримазола и цефазолина, взятых в качестве контроля. К сожалению, авторы не указали, какие именно штаммы были испытаны.



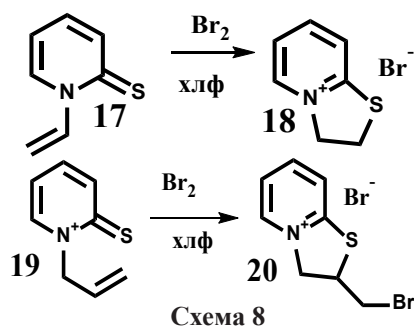
2-Винилоксипиридин под действием брома образует бромид 2-бром-2,3-дигидрооксазоло[2,3-а]пиридиния **12** (схема 6) [11].



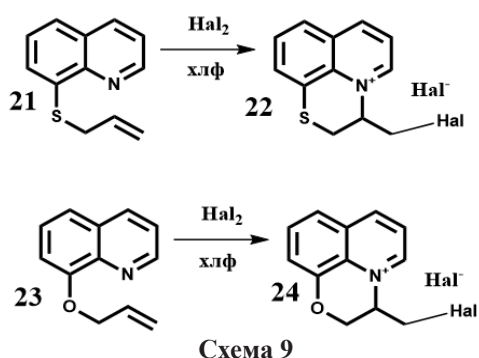
Аналогично ведут себя 2-винилтиопиридин **13** и 2-винилтиохиолин **15** (схема 7) с образованием соответствующих бромидов тиазоло[2,3-а]пиридиния **14** и – хиолиния **16** [12].



Интересно протекает циклизация N-винилпиридин-2(1H)тиона **17**, приводящая к образованию бромида 2,3-дигидро-1H-индолизин-4-иума **18**, (схема 8), тогда как с аллильным производным **19** образуется «нормальный» продукт – 2-(бромметил)-2,3-дигидротиазоло[3,2-а]пиридин-4-иум бромида **20** [13, 14].

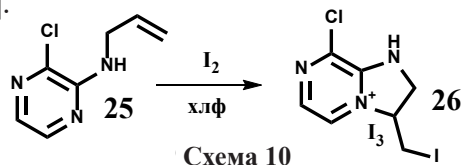


Разумеется, возможны и «обратные» варианты циклизации (схема 9) – атака на атом хинолинового азота, исходя из 8-аллилтиохинолина **21** или 8-аллилоксихинолина **23** [15, 16], что приводит к образованию продуктов **22** и **24**.

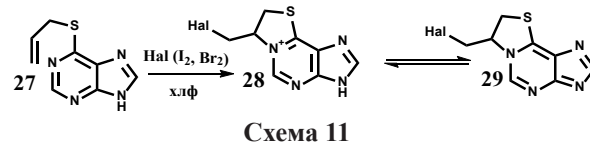


Кроме пиридина и хинолина в реакциях галогенциклизации могут участвовать и другие азотсодержащие гетероциклы. Так, N-аллил-3-хлорпиразин-2-амин **25** (схема 10) под действием иода циклизуется в три-

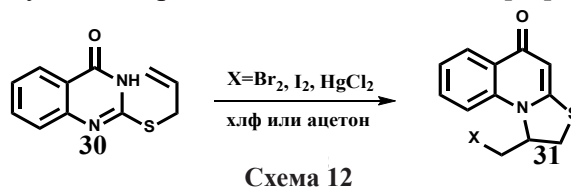
иодид 8-хлор-3-(иодметил)-2,3-дигидро-1H-имидазо[1,2a]пиразин-4-пиразиниум **26** [17].



При взаимодействии 6-аллилтиопурина **27** с избытком галогена в хлороформе образуются тригалогениды 7-галогенметил-7,8-дигидротиазоо[2,3-і]пуринов **28**, легко переходящие в 7-галогенметил-7,8-дигидротиазоо[2,3-і]пурины **29** (схема 11) [18].



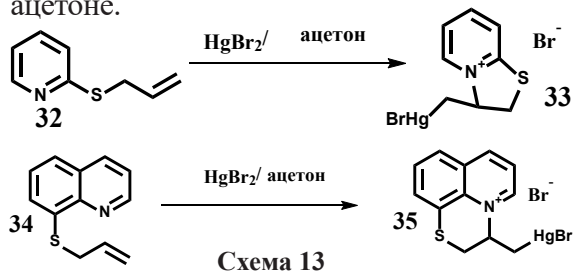
Орчак с соавторами сообщил о гетероциклизации S-аллильных производных хиनाзолина **30** (схема 12) под действием различных электрофильных агентов с получением трициклических систем **31** [19].



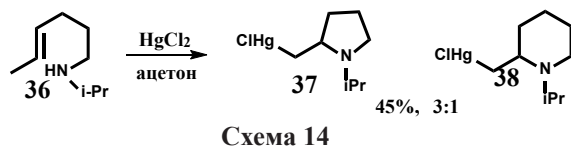
Гетероциклизации под действие солей ртути

Использование галогенидов, ацетатов, трифторацетатов ртути в практике органического синтеза достаточно известно. В нашей стране основные работы по внутримолекулярной электрофильной циклизации различных N-, O-, S-аллилированных гетероциклов принадлежат школе Дмитрия Гымнановича Кима (Южно-Уральский государственный национальный исследовательский университет). В работах Д. Г. Кима показано, что S-аллильные производные 2-меркаптопиридина **32** и 2-меркаптохинолина **34** (схема 13) [20] легко дают бромиды 3-броммеркурометил-2,3-дигидротиазоло[3,2-а]

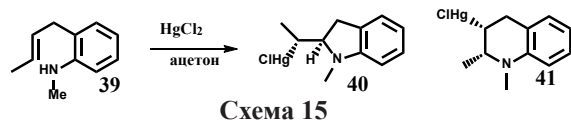
пиридиния **33** и – хинолиния **35** соответственно при обработке бромидом ртути в ацетоне.



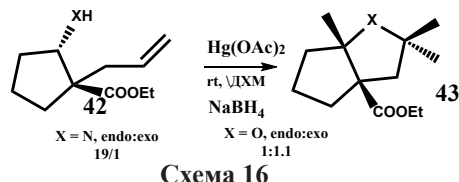
В текущей литературе по циклизации аллильных производных, как правило, используются галогениды двухвалентной ртути или её ацетаты и бис-трифторацетаты. Так, в работе [21] (схема 14) показано, что N-изопропил-1-аминогекс-4-ен **36** с одним эквивалентом хлорида ртути даёт смесь производных пирролидина **37** и пиперидина **38** в соотношении 3:1.



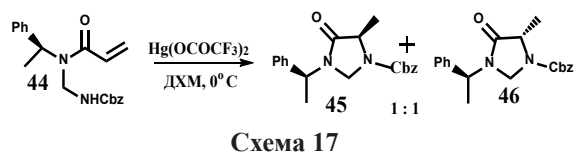
В то же время N-метил-2-бут-2'-ен **39** образует цис-продукт **40** наряду с производным пиперидина **41** [22] (схема 15).



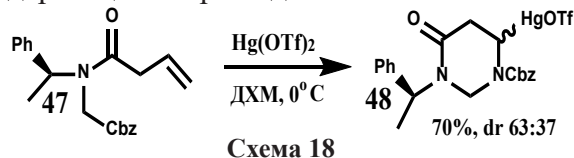
Наличие в молекуле подвижного атома водорода позволило осуществить получение полностью гидрированных азот- или кислородсодержащих гетероциклов (схема 16), причём в случае азотсодержащего – с высокой энантиоселективностью, как это показано при трансформации **42** в **43** [23].



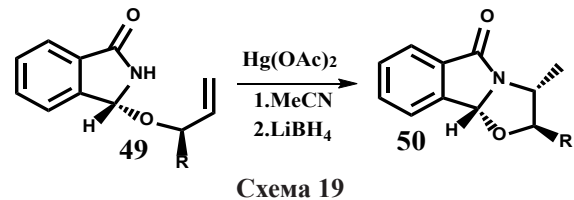
Как описано в работе [24], при обработке соединения **44** трифторацетатом ртути образуется диастереомерная пара имидазолов **45** и **46** в соотношении 1:1 (схема 17).



При использовании же аллильного производного **47** (схема 18) образуются соответствующие производные ртутисодержащего пиримидина **48**.



O-Аллильное производное фталимида **49** с высокой диастереоселективностью превращается в трициклическое производное **50** при обработке эквивалентом ацетата ртути с последующим восстановлением боргидридом лития (схема 19) [25].



Гомоаллильные производные бензоксазина **51**, как и содержащие фрагмент терминального бутена **54**, ведут себя аналогично, образуя соответственно пяти- **52**, **53** или шестичленный аннелированный гетероцикл **55**, **56** (схема 20) [26].

Лярок и Харрисон [27] показали (схема 21), что в реакции циклизации под действием ацетата ртути (схема 21) могут вступать и орто-замещённые ацетилены **57**, **59** и **61**, причём природа гетероатома в орто-положении роли не играет, что приводит к получению замещённых бензотиофенов **58**, бензофуранов **60** и индолов **62**.

Наряду с ацетатом ртути используют и соответствующие галогениды. Так, Бисвас использовал сулему (схема 22) или диодид ртути для циклизации ацетиленов **63** в дигидропиридин **64**, причём решающую роль в образовании продукта играет

не гетероатом X, а характер ацетилен: для терминального ацетилен характерно образование соединения **64**, а для интернального – образование продуктов **65** (дигидропирролов, дигидрофуранов или карбоциклов) [28].

Интересный пример влияния хирального катализатора приведен в статье [29] (схема 23). Авторами получен рацемический винилиндолин **67** при обработке со-

единения **66** каталитическим количеством трифлата ртути при комнатной температуре и, кроме того, (S)-1-тозил-2-винилиндолин **68** с *ee* 99% при катализе (R)бинафаном. Похожие результаты получили Курисаки с соотр. (схема 24) [30], также при использовании каталитических количеств трифлата ртути для циклизации ацетилен **69** в N-тозилированный индол **70**.

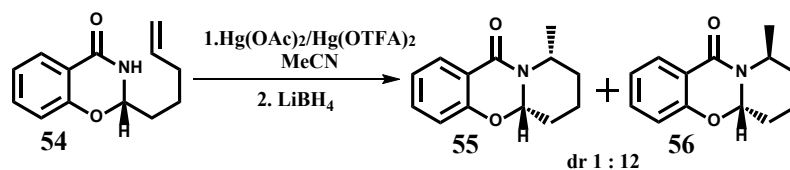


Схема 20

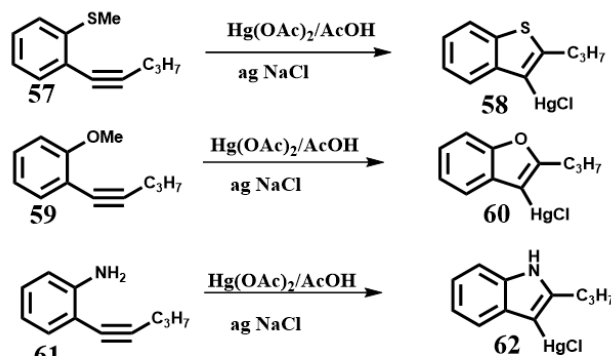


Схема 21

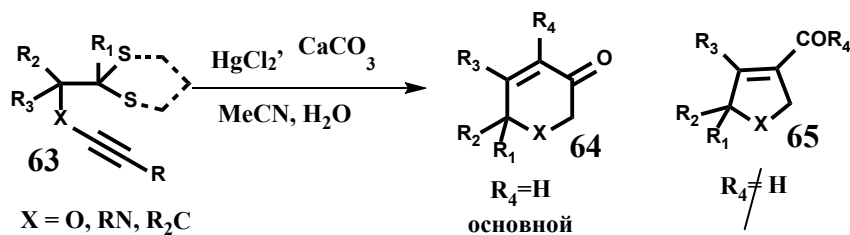


Схема 22

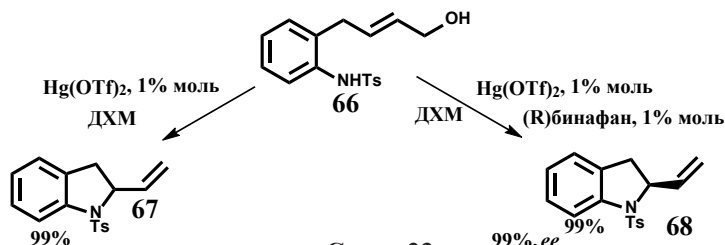


Схема 23

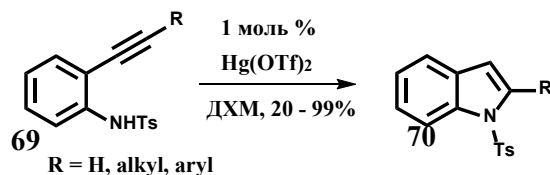


Схема 24

Циклизация 6-аминогекс-1-ина **71** в присутствии каталитического количества (1 моль %) нитрата ртути в ацетонитриле приводит к получению 2-метил-1,2-дигидропиперидина **72** (схема 25) – перспективного синтона для получения аннелированных гетероциклов [31].

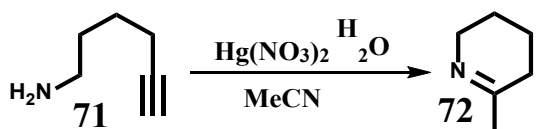


Схема 25

Занг и Хайдер показали, что анилид **73** при действии каталитического количества ацетата ртути даёт трициклический продукт **74** (схема 26), причём реакцию проводили в редко используемой в данных реакциях муравьиной кислоте [32].

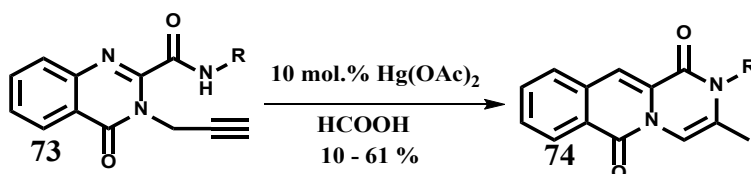


Схема 26

Радикальную циклизацию N-аллилбензамидов **75** в замещённый дигидроизохинолон **76** под действием [бис(дифторацетокси)иодо]бензола осуществили авторы [33] (схема 27).

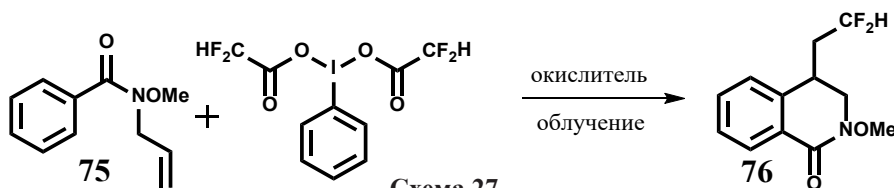


Схема 27

Кроме использования солей ртути, применяют и другие циклизующие агенты. Так, интересный синтез аналогов тропановых алкалоидов **78** осуществили авторы [34] (схема 28). На решающей стадии циклизации соединения **77** был использован рутениевый катализатор Граббса 2-ого рода.

получения серии хроман-4-онов и хинолин-4-онов **80**, содержащих дифторметильную группу.

В работе [35] (схема 29) показана применимость солей меди для циклизации 2-(аллилокси)арилальдегидов **79** для

В реакциях циклизации открытоцепных соединений, содержащих гетероатом в цепи, можно применять «органометаллокатализ», например, (схема 30) авторы [36] получили таким образом представительный ряд замещённых N-метилпир-ролидинонов **82** из аллиламидов **81**.

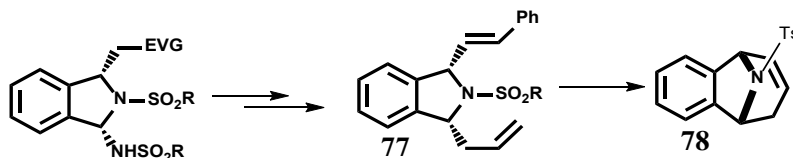


Схема 28

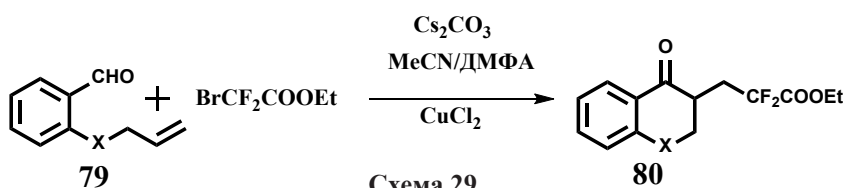


Схема 29

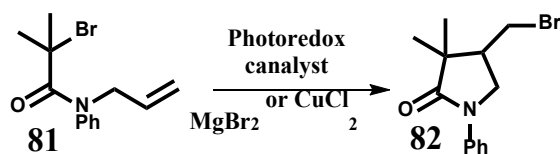


Схема 30

Арилдиформетилирование соединений **83** в соответствующие индолоны-2 **84** достаточно просто осуществляется (схема 31) за счёт использования возникающих при облучении производных, например, диформетилсульфонов, радикалов [37].

Китайские исследователи показали возможность дифторалкилирования соединения **85** (схема 32) для синтеза соответ-

ствующих производных дигидробензофурана и –индола **86** [38].

Проблемы функционализации продуктов внутримолекулярной циклизации решаются иногда довольно своеобразно (схема 33). Так, авторы [39] использовали производные алленов **87** для синтеза β -карболинов **88** под действием N-иодсукцинимда.

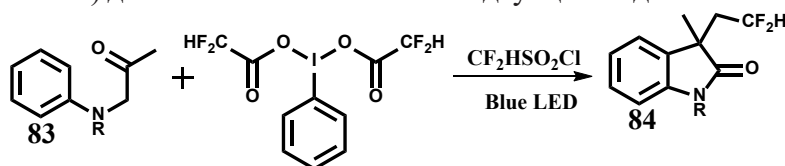


Схема 31

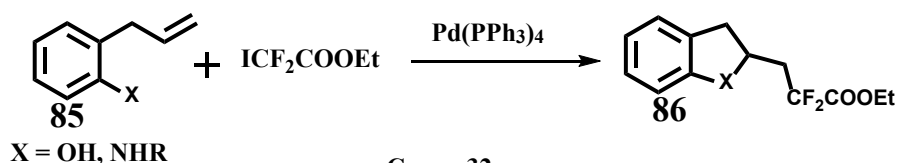


Схема 32



Схема 33

Альваро и др. [40] показали, что 1-аллил-(2-трет.бутил)-1-бензил-3-оксоиндолин-1,2-дикарбоксилат **89** (схема 34) при катализе аллильными комплексами палладия превращается в трет.бутил 1-аллил-1-бензил-3-оксоиндолин-2-карбоксилат **90**, тогда как N-незащищённое производное **91** можно перевести в 10-бензил-1,10b-пиридо[2,1-a]изоиндол-6(4H)-он **92**.

Следует отметить, что большинство работ по взаимодействию непредельных (в основном аллильных) соединений с различными производными, содержащими ртуть, используются авторами для

формирования новых связей углерод-углерод или углерод-гетероатом и, по формированию необходимой структуры, атом ртути, как правило, удаляется или боргидридами металлов, или галогеном. Так, интересный подход к аналогам мезембриновых алкалоидов **93** продемонстрирован в работе [41] (схема 35). Ещё более интересен синтез морского алкалоида мандангамина А **94**. [42].

Сведения о биологической активности продуктов ртутициклизации/демеркурирования весьма скудны, что объясняется в большинстве случаев известной биологической активностью целевых продуктов.

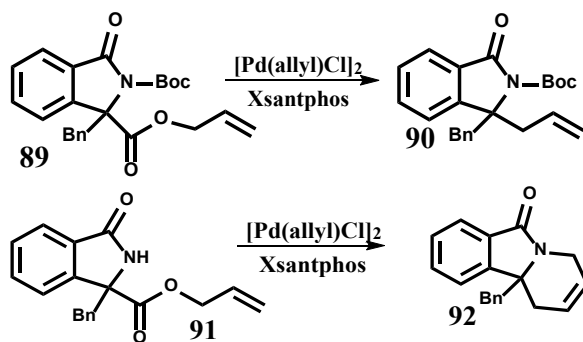


Схема 34

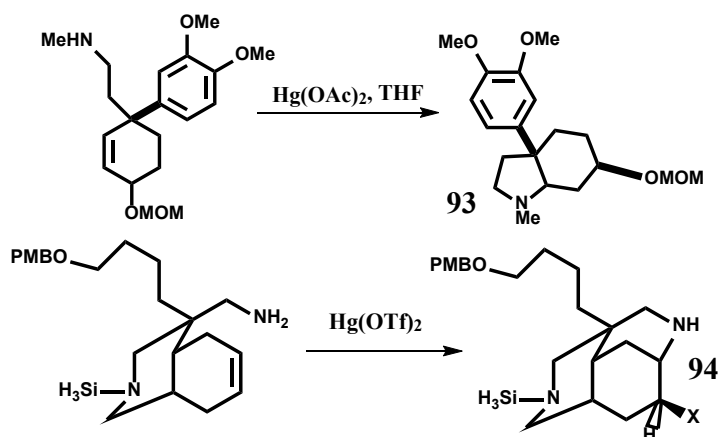


Схема 35

Сведения о биологической активности продуктов ртутициклизации/демеркурирования весьма скудны, что объясняется в большинстве случаев известной биологической активностью целевых продуктов.

Вместе с тем, несмотря на многочисленные ссылки на биологическую активность продуктов реакции, первоначально образующиеся ртутьорганические соединения практически не испытывались в качестве БАС.

При изучении противомикробного действия некоторых производных 3,4-ди-

гидроизохинолина было установлено (схема 36), что действие препарата **96**, полученного из N-аллил-3,3-диметил-3,4-дигидроизокарбостирила **95**, на бактерии *S.haemolyticus 18*, и полученного лабораторной селекцией его производного штамма *S.haemolyticus 18₃₃*, обладающего устойчивостью к ванкомицину, находится на уровне 1×10^{-2} мкг/мл. В качестве референтных штаммов при оценке антибиотикочувствительности использовали бактерии *S.aureus ATCC 25923* и *S.epidermidis 33 GISK* [43].

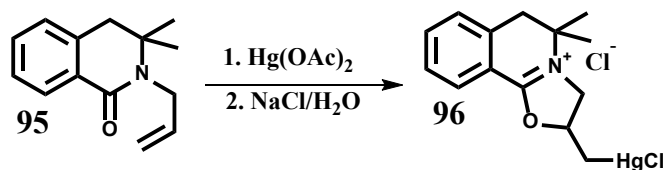


Схема 36

Библиографический список

1. А. Г. Макарова, А. Н. Несмеянов, Методы элементоорганической химии. Ртуть. Москва: «Наука», 1965. с. 115-181
2. Y. - S.Wu, The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review / Y.-S.Wu, A. I. Osman, M. Hosny, A. M. Elgarahy, A. S. Eltaweil, D. W. Rooney, Zh. Chen, N. S. Rahim, M. Sekar, S. C. B. Gopinath, N.N.I. M. Rani, K. Batumalaie, P. S.Yap./ ACSOmega. 2024, 9, 5, 5100-5126 (Review), DOI: 10.1021/acsomega.3c07047
3. J. F. Risher., Organic mercury compounds: human exposure and its relevance to public Health / J.F. Risher., H.E. Murray, G.R. Prince // Toxicology and Industrial Health, 2002; 18: 109/160. Doi 10.1191/0748233702th138oa
4. F. Maqsood, Recent trends in medicinal applications of mercury based organometallic and coordination compounds / F. Maqsood , S. S. Al-Rawi, A. H. Ibrahim, F. Jamil, A. Zafar, M.A. Iqbal, U.S. Shoukat, M. Asad , S. U. Zia, F. Ahmad, M. Atif // Rewievs in Inorganic Chemistry, 45, 2025, 375–396. doi. org/10.1515/revic-2024-0033
5. D. Ukale, Organomercury Nucleic Acids: Past, Present and Future / D. Ukale, T. Lönnberg // Chembiochem, 2021; 22(10):1733-1739. doi:10.1002/cbic.202000821
6. Г. Дженкинс, У. Хартунг, Химия органических лекарственных препаратов // Москва: Изд. Иностран. Лит., 1949, с. 502 -506
7. Д.Г. Ким, Новый синтез [1,3]тиазино[3',2',2,3][1,2,4]триазино[5,6-*b*]индольной системы / Д.Г. Ким, А.В. Журавлёва // ХГС, 2009, № 10, 1590-1592
8. А.В. Рыбакова, О направлении реакций гетероциклизации 3-аллил- и 3-пропаргилсульфанил-5Н-[1,2,4]триазино[5,6-*b*]индолов / А.В. Рыбакова, П.А. Слепухин, Д. Г. Ким // ХГС, 2013, № 8, 1320-1324
9. Д.Г. Ким, Исследование галогенциклизации S- и N-аллильных производных 2-бензотиазолтиона / Д.Г. Ким, Н.М. Судолова, П.А. Слепухин // ХГС, 2011, № 5, 760-765
10. Калита Е.В., Петрова К.Ю., Ким Д.Г. Конденсированные [1,3]триазолоазиниевые системы с узловым атомом азота, обладающие фунгицидной и бактериостатической активностью. Пат. РФ 2 717 943, опубл. 27.03.2020, Бюл. № 9
11. Скворцова Г.Г., Необычное взаимодействие 2-винилоксипиридина с бромом / Скворцова Г. Г., Ким Д. Г., Сигалов М. В. // ХГС, 1975, 8, 1147 – 1148
12. Скворцова Г.Г., О синтезе тиазоло[2,3-*a*]пиридиновых солей / Скворцова Г. Г., Ким Д. Г., Сигалов М. В. // ХГС, 1976, 6, 858
13. Г.Г. Скворцова, Способ получения дигидротиазоло[3,2-*a*]хинолиний бромидов / Г.Г. Скворцова, Д.Г. Ким, Л.М. Ким. А.с. СССР 854930, БИ 1981, № 30
14. Г.Г. Скворцова, 2-бромметилтиазоло[5,4,3-*ij*]хинолиний бромид, проявляющий туберкулоустатическую активность / Г.Г. Скворцова, Д.Г. Ким, С.Н. Тандура, А.Е. Александрова, Б.И. Вишневецкий, Л.Н. Эртевциан. А.с. СССР 707220
15. Д. Г. Ким, Синтез галогенидов 2,3-дигидро[1,4]тиазино[2,3,4-*ij*]хинолиния / Д.Г. Ким, Д. Н. Амбур, И. А. Шеина // Изв. ВУЗов, Химия и хим. технология, 1993, 3, 111 – 113
16. Д. Г. Ким, Галогенциклизация 8-аллилоксихинолинов /Д. Г. Ким, Э. Р. Закирова // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология, 1993, 3, 46-48
17. P.A. Slepukhin, Simple synthesis of imidazo[1,2-*a*]pyrazines / P. A. Slepukhin, D. G. Kim, G. L. Rusinov, V. N. Charushin, O. N. Chupakhin // Chem. Heterocyclic Comp. 38, 1142–1143 (2002). doi. org/10.1023 / A:1021282004750
18. D.G. Kim, Synthesis of derivatives of 7,8-dihydrothiazolo[2,3-*i*]purine by halocyclization of 6-allylthiopurine / D. G. Kim, Yu. R. Galina // Chem Heterocycl Compd, 40, 10, 1339 – 1341, 2004. doi.org/10.1007/s10593-005-0076-9
19. V.V. Orysyk, Heterocyclization of 2-(2-propenylthio)-4(1H)-quinazolinone under the influence of electrophilic agents / V. V. Orysyk,; A. A. Dobosh, Yu. L Zborovskii, V. I. Staninets, S. M. Khripak // Ukrainskii Khimicheskii Zhurnal (Russian Edition) (2001), 67(9-10), 46-48
20. Ким Д.Г., Меркуроциклизация 2-аллилтиопиридинов / Ким Д.Г., Слепухин П.А. Меркуроциклизация 2-аллилтиопиридинов. // ХГС, 1999, 12, 1694.

21. *Perie, J.J.*; Reaction d'aminomercuration–VII: Heterocyclisation intramoléculaire d'amines éthyleniques: Etude des différents paramètres / Perie, J. J.; Laval, J. P.; Roussel, J.; Lattes, A. // *Tetrahedron*. 1972, 28, 675–699. doi:10.1016/0040-4020(72)84031-6
22. *Roussel, J.*; Reaction d'aminomercuration VIII: Stereochimie /Roussel, J.; Perie, J.J.; Laval, J.P.; Lattes, A. // *Tetrahedron*. 1972, 28, 701–716. doi:10.1016/0040-4020(72)84032-8].
23. *Peçanha, E.P.*; Highly diastereoselective mercury-mediated synthesis of functionalized 2-azabicyclo[3.3.0]octane derivatives / Peçanha, E. P.; Verli, H.; Rodrigues, C. R.; Barreiro, E. J.; Fraga, C. A. M. // *Tetrahedron Lett.* 2002, 43, 1607–1611. doi:10.1016/s0040-4039(02)00074-6
24. *Amoroso, R.*; Synthesis of L and D α -amino acids from chiral amidals / Amoroso, R.; Cardillo, G.; Tomasini, C. // *Tetrahedron Lett.* 1990, 31, 6413–6416. doi:10.1016/s0040-4039(00)97079-5
25. *Takacs, J. M.*; A Removable Auxiliary for Amidomercuration Reactions: The Stereocontrolled Preparation of Vicinal Amino Alcohols / Takacs, J. M.; Helle, M. A.; Yang, L. // *Tetrahedron Lett.* 1989, 30, 1777–1780. doi:10.1016/s0040-4039(00)99577-7
26. *Takacs, J. M.*; A removable auxiliary for amidomercuration reactions: The stereoselective preparation of substituted n-acyl pyrrolidines and piperidines / Takacs, J. M.; Helle, M. A.; Takusagawa, F. // *Tetrahedron Lett.* 1989, 30, 7321–7324. doi:10.1016/s0040-4039(00)70687-3
27. *Larock, R. C.*; Mercury in Organic Chemistry. 26.' Synthesis of Heterocycles via Intramolecular Solvomercuration of Aryl Acetylenes / Larock, R. C.; Harrison, L. W. // *J. Am. Chem. Soc.* 1984, 106, 4218–4227. doi:10.1021/ja00327a026
28. *Biswas, G.*; Mercuric Chloride and Iodide Mediated Cyclization of Tethered Alkyndithioacetals as a General Route to Five- and Six-Membered Rings: Tuning of Regioselectivity by Alkyne Substitution / Biswas, G.; Ghorai, S.; Bhattacharjya, A. // *Org. Lett.* 2006, 8, 313–316. doi:10.1021/ol0527274
29. *Namba, K.*; Hg(OTf)₂-Catalyzed Cyclization of N-Tosylanilinoallylic Alcohols to 2-Vinylindolines / Namba, K.; Nakagawa, Y.; Yamamoto, H.; Imagawa, H.; Nishizawa, M. // *Synlett*. 2008, 1719–1723. doi:10.1055/s-2008-1077881
30. *Kurisaki, T.*; Hg(OTf)₂-Catalyzed cycloisomerization of 2-ethynylaniline derivatives leading to indoles / Kurisaki, T.; Naniwa, T.; Yamamoto, H.; Imagawa, H.; Nishizawa, M. // *Tetrahedron Lett.* 2007, 48, 1871–1874. doi:10.1016/j.tetlet.2006.12.120
31. *Müller, T. E.*; Intramolecular hydroamination of alkynes catalysed by late transition metals / Müller, T. E.; Pleier, A.-K. // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1999, 583. doi:10.1039/a808938h
32. *Zhang, J.*; An efficient access to novel 2H-pyrazino[2,1-b]quinazoline-1,6-diones via intramolecular alkyne hydroamination (16-9495SP)/Zhang, J.; Haider, N. // *ARKIVOC*. 2016, No. iii, 125–133. doi:10.3998/ark.5550190.p009.495
33. *X. Wang, R. Liu, Sh. Zhang, T. Zhou, X. Zhao, K. Lu.* Visible-light-induced radical cyclization of N-allylbenzamide with Bis(difluoroacetoxy)iodo]benzene to difluoromethylated dihydroisoquinolinones // *Tetrahedron Lett.* 96 (2022) 153761. Doi /doi.org/10.1016/j.tetlet.2022.153761
34. *T. Tsujihara,* Synthesis of 6,7-benzene-fused tropane derivatives from isoindoline-aminal hybrid compound / T. Tsujihara, R. Sasaki, M. Fukkoshi, S. Hatakeyama, T. Takehara, T. Suzuki, T. Kawano // *Tetrahedron Lett.*, 95, (2022), 153724. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2022.153724
35. *W. Guo,* Copper-catalyzed radical cascade cyclization of 2-(allyloxy)arylaldehydes towards chroman-4-one derivatives / W. Guo, L. Gui, X. Chen, Zh. Dai, L. Wang, X. Wang. // *Tetrahedron Lett.*, 94, (2022) 153605. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.153605
36. *N. Tsuchiya,* Atom-transfer radical cyclization of α -bromocarboxamides under organophotocatalytic conditions / N. Tsuchiya, Y. Nakashima, G. Hirata, T. Nishikata. // *Tetrahedron Lett.*, 69, (2021) 152962. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152962
37. *K. Lu,* Visible-light induced radical aryldifluoromethylation of N-arylacrylamides by bis(difluoroacetoxy)iodo]benzene / K. Lu, L. Lei, Q. Wei, T. Zhou, X. Jia, Q. Li, X. Zhao. // *Tetrahedron Lett.*, 67, (2021) 152864. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152864
38. *M.-J. Ma,* Difluoroalkylation of alkenes promoted by noncovalent interaction: A general method for the synthesis of difluoro-contained dihydrobenzofurans and indolins / M.-J. Ma, J. Jia, G. Yan, C. Yin, W. Yu, P. Guo, L. Zhao, Ch.-Y. He. *Tetrahedron Lett.*, 67, (2020) 152558. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152558

39. N. Ding, NIS-promoted intramolecular cyclization of allenamides for the synthesis of tetrahydro- β -carbolines / N. Ding, X.-F. Zhong, X.-J. Tan, L. Yang, T. Hong, X.-X. Li, Z.-G. Zhao. // *Tetrahedron Lett.*, 81, (2021) 153334. doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.153334
40. M. Alvarado, Synthesis of 3,3-disubstituted allyl isoindolinones via Pd-catalyzed decarboxylative allylic alkylation / M. Alvarado, M. Loo, H. Adler, C. Arnall, K. Amsden, G. Martinez, R. Navarro // *Tetrahedron Lett.*, 148, (2024) 155242. doi.org/10.1016/j.tetlet.2024.155242
41. Chida, N.; Chiral and stereoselective total synthesis of (-)-mesembranol starting from D-glucose / Chida, N.; Sugihara, K.; Ogawa, S. // *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1994, 901. DOI:10.1039/C39940000901
42. Matzanke, N.; A Concise Approach to the Tricyclic Core of the Cytotoxic Marine Alkaloid Madangamine A / Matzanke, N.; Gregg, R. J.; Weinreb, S. M.; Parvez, M. // *J. Org. Chem.* 1997, 62, 1920. DOI: 10.1021/jo970208b
43. Кононова Л.И., Синергидное действие катионного пептида хоминина и нового дезинфектанта на основе изохинолина на образование биоплёнок полирезистентных стафилококков / Кононова Л.И., Пьянков И.А., Смоляк А.А., Шкляев Ю.В., Коробов В.П. // *Антибиотики и Химиотерапия.* 2020;65(5-6):11-18 doi.org/10.37489/0235-2990-2020-65-5-6-11-18 09.

HETEROCYCLIZATION OF SOME UNLIMITED COMPOUNDS UNDER THE ACTION OF ELECTROPHILIC AGENTS

Smolyak A.A., Shklyayev Yu.V.

Institute of Technical Chemistry UB RAS

For citation:

Smolyak A.A., Shklyayev Yu.V. Heterocyclization of some unlimited compounds under the action of electrophilic agents // *Perm Federal Research Center Journal.* – 2025. – № 4. – P. 62–73. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.5>

The review considers the formation of nitrogen-, oxygen- and sulfur-containing heterocycles in the interaction of non-limiting compounds with electrophilic reagents of various nature: halogens, salts of divalent mercury and some others.

Keywords: non-limiting compounds, electrophilic reagents, heterocyclization.

Сведения об авторах

Смоляк Андрей Алексеевич, кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 614068, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 3; e-mail: smolyak.andrew@gmail.com
Шкляев Юрий Владимирович, доктор химических наук, заведующий лабораторией синтеза активных реагентов, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: yushka49@mail.ru

Материал поступил в редакцию 14.10.2025

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ КРЫЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

Р.А. Степанов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Степанов Р.А. Моделирование аэродинамических характеристик профиля крыла с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 74–79. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.6>

В работе рассматривается применение искусственных нейронных сетей для решения прямой и обратной задач аэродинамического моделирования на примере двумерного профиля крыла NASA2415. На основе численного решения стационарных уравнений Навье–Стокса формируется обучающая выборка, включающая аэродинамические коэффициенты подъемной силы и сопротивления для различных значений геометрических параметров и угла атаки. Построена нейронная сеть с двумя скрытыми слоями по 10 нейронов и сигмоидальной активацией, проведено её обучение на выборках с регулярным и случайным распределением параметров. Продемонстрирована возможность решения обратной задачи — восстановления геометрических параметров профиля крыла и угла атаки по заданным аэродинамическим коэффициентам с уровнем ошибки не более 5%. Полученные результаты подтверждают эффективность нейронных сетей для моделирования и инверсного проектирования аэродинамических профилей.

Ключевые слова: нейронные сети, аэродинамические коэффициенты, обратная задача, NASA, профиль крыла.

Введение

Оптимизация аэродинамических характеристик профиля крыла является одной из ключевых задач современного авиастроения. Традиционные подходы основываются на многократном численном решении уравнений Навье–Стокса для

различных вариантов геометрии и условий обтекания, что делает задачу чрезвычайно вычислительно затратной, особенно при необходимости многокритериальной оптимизации параметров. В этой связи особое значение приобретают методы машинного обучения, позволяющие строить

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9 Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности).

высокоточные суррогатные модели аэродинамических характеристик.

Применение нейронных сетей к задачам аэродинамического анализа началось ещё в конце 1990-х – начале 2000-х годов, когда были показаны первые успешные примеры аппроксимации коэффициентов подъёмной силы и сопротивления по параметрам геометрии профиля [1]. Последующие исследования демонстрируют, что искусственные нейронные сети могут существенно ускорить прямое вычисление аэродинамических коэффициентов и служить эффективной альтернативой численным методам в задачах оптимизации формы [2].

Особый интерес представляют обратные аэродинамические задачи, в которых требуется по заданным аэродинамическим характеристикам восстановить геометрию профиля или параметры его обтекания. Благодаря способности нейронных сетей моделировать сложные нелинейные зависимости, они оказываются эффективным инструментом для инверсного проектирования. В работах [3, 4] продемонстрированы подходы, основанные на глубоких нейронных сетях и многоуровневых моделях, которые позволяют определять форму профиля по целевым значениям безразмерных аэродинамических коэффициентов C_L (подъёмной силы) и C_D (лобового сопротивления) с высокой точностью и значительно меньшими вычислительными затратами.

Развитие машинного обучения также привело к появлению новых гибридных методов, сочетающих высокоточные CFD-вычисления, редуцированные порядковые модели и нейросетевые аппроксиматоры. Такие подходы применяются в задачах оптимизации формы крыла и в автоматизации проектных процедур [5].

Ключевым компонентом любого алгоритма аэродинамического проектирования является параметризация геометрии.

Существенный вклад в эту область внесли классические работы по анализу методов параметризации формы, включая обзор подходов для оптимизации аэродинамических контуров [6]. Значительный интерес для инженерной практики представляет универсальный метод параметрического описания профилей, предложенный в исследовании [7], который обеспечивает компактность представления и хорошую управляемость формы. В задачах, связанных с машинным обучением, широко используются различные схемы параметризации профиля крыла, в том числе методы, направленные на реконструкцию формы по заданному распределению давления [8].

Исходя из анализа современных исследований, можно сделать вывод, что применение нейронных сетей к задачам прямого и обратного аэродинамического проектирования является перспективным направлением, однако проблема восстановления параметров профиля NASA по заданным аэродинамическим характеристикам остаётся актуальной. Эта задача особенно важна в контексте разработки быстродействующих инструментов оптимизации крыла, основанных на численном моделировании обтекания и последующей нейросетевой инверсии.

Целью исследования является анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения прямой и обратной задач аэродинамики на модельном примере обтекания профиля крыла NASA2415. В работе предполагается рассмотреть новые варианты организации входных и выходных параметров нейронной сети при аппроксимации зависимости между геометрией профиля, углом атаки и аэродинамическими коэффициентами.

Создание обучающего набора данных

Для обучения нейронной сети, предназначенной для решения прямой и обратной задач аэродинамического моделирования,

формируются данные на основе численного решения задачи обтекания профиля крыла. Процесс генерации обучающей выборки состоит из нескольких ключевых шагов: параметризация профиля и выбор диапазона значений параметров; численное решение прямой задачи; вычисление аэродинамических характеристик.

В качестве модельного профиля использована стандартная параметриза-

ция NASA 4-значного семейства [9] через три параметра: максимальный относительный изгиб m , положение этого изгиба p и относительную толщину t . Часто используемой конфигурацией является NASA2415, для которой $m=0.02$, $p=0.4$, $t=0.15$. В данной работе этот профиль рассматривается как основной, в котором изменяются только m и t (см. рис. 1).

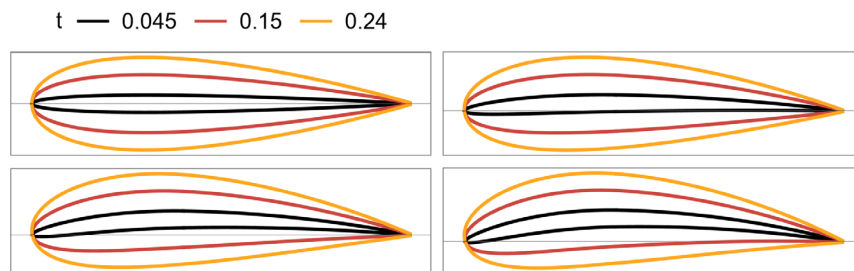


Рис. 1. Профили крыла NASA при различных m и t : (а) $m=0$, (б) $m=0.02$, (в) $m=0.04$ и (г) $m=0.06$

В соответствии с каждым профилем и заданным углом атаки из диапазона $-12^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ численно моделируется установившееся обтекание двумерного профиля крыла вязким несжимаемым потоком в прямоугольной области. Расчётная область представляет собой прямоугольный канал с «вырезом» под профиль крыла. На входной и боковых границах задается потенциальное поле скорости, полученное из предварительного расчета безвихревого обтекания. Граница выхода потока

является свободной. Уравнения Навье-Стокса решается при числе Рейнольдса 10^3 методом конечных элементов в пакете Wolfram Mathematica. Сетка со средним размером конечного элемента 0.02 и четырехкратным сгущением на поверхности крыла позволяет найти устойчивое решение с точностью 10^{-4} без привлечения моделей турбулентности. Характерное распределение поля скорости и давления для профиля NASA2415 при $\alpha=6^\circ$ показано на рис. 2.

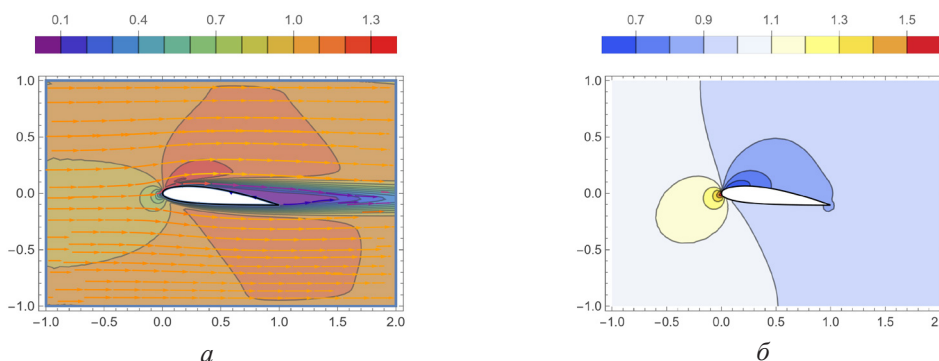


Рис. 2. Распределение поля скорости (а) и давления (б) для профиля NASA2415

По вычисленным полям скорости и давления на поверхности профиля вычисляются аэродинамические силы, которые

в безразмерной постановке приводят к коэффициентам подъёмной силы C_L и сопротивления C_D (см. рис 3). В результате рас-

четов прямой задачи сформировано три набора данных: один с равномерным покрытием интервалов значений параметров $\{m, t, \alpha\}$ (180 вариантов) и два со случайным распределением (180 вариан-

тов в каждом). Эти данные далее используются в качестве обучающей выборки для задачи оптимизации, валидационной выборки для отслеживания переобучения или тестовой выборки для оценки ошибки.

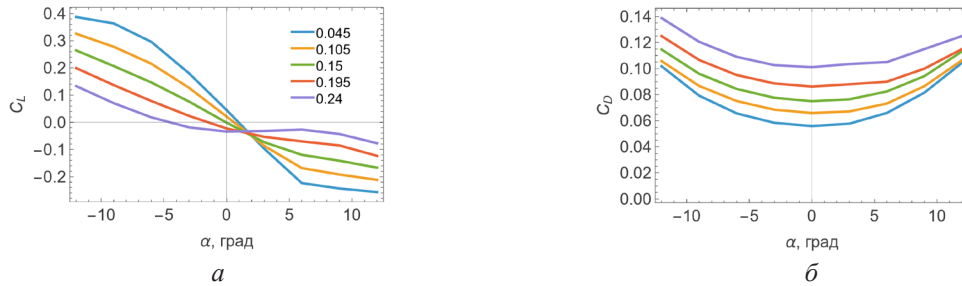


Рис. 3. Зависимости аэродинамических коэффициентов от t и α при $m=0.04$

Результаты решения прямой и обратной задачи с помощью нейросети

Для решения прямой и обратной задач аэродинамического моделирования была использована искусственная полносвязная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями с 10 нейронами в каждом. При большем значении нейронов проявлялся эффект переобучения. В качестве активационной функции между скрытыми слоями была выбрана сигмоида. Основная цель сети заключалась в аппроксимации зависимостей между параметрами крыла, угла атаки и аэродинамическими коэффициентами, т.е. для прямой задачи на вход нейронной подаются три значения, а на выходе получают два значения (и наоборот, для обратной задачи). Общее число параметров сети с учетом

свободных весов 70. В целом это классическая задача регрессии, которая в данном конкретном случае имеет свои особенности.

В рамках решения прямой задачи был проведён анализ точности определения аэродинамических коэффициентов в сравнении с линейной интерполяцией. Нейронная сеть, обученная на регулярной выборке, даёт ошибку в два раза меньшую, чем линейная интерполяция. В то время как для сети, обученной на выборке того же размера, но со случайным выбором параметров, ошибка оказалась в 5 раз меньше. Это говорит о том, что преимущество нейросети проявляется в большей степени в ситуации неструктурированных входных данных, которая всегда имеет место при решении обратной задачи.

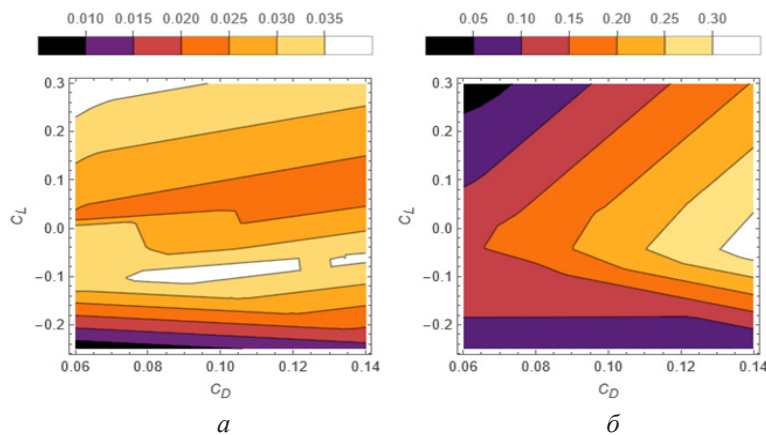


Рис. 4. Зависимость определенных нейросетью параметров профиля t (а) и t (б) от аэродинамических коэффициентов

Рассмотрим решение задачи обратного дизайна, т.е. нахождения параметров профиля, по заданным C_L и C_D . Результат показан на рис. 4, соответствует обучению до уровня ошибки 5% на тестовой выборке. Таким образом, нейронная сеть позволяет оценить параметры профиля, которые соответствуют максимальной подъемной силе и минимальному сопротивлению. Это достигается при минимальной t и $m=0.04$, что заметно отличается от NACA2415 ($m=0.02$).

При этом надо отметить, что угол атаки может быть любым. С использованием нейросети можно устранить данную неоднозначность. Для этого необходимо обучать новую нейросеть, на вход которой подавать значения $\{C_L, C_D, \alpha\}$, а минимизировать ошибку только по $\{m, t\}$. Результат такого обучения показан на рис 5. Оптимальные значения $\{m, t\}$ получились практически такими же, но зависимость m от C_D при наибольшем C_L получилась обратной.

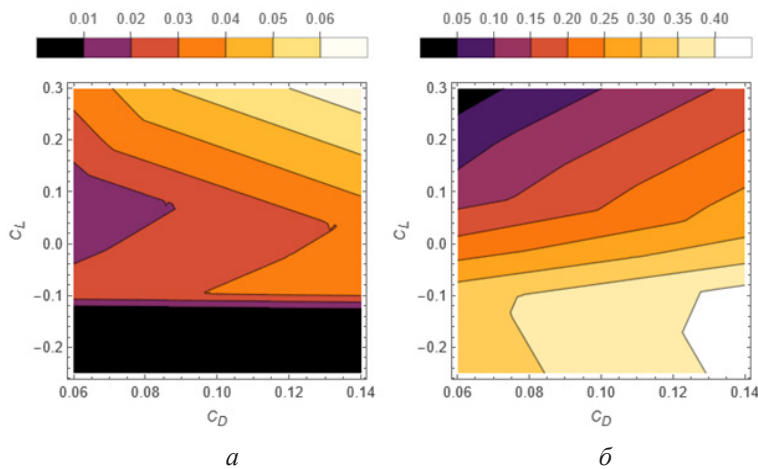


Рис. 5. Зависимость определенных нейросетью параметров профиля m (а) и t (б) от аэродинамических коэффициентов при фиксированном угле $\alpha=6^\circ$

Заключение

В данной работе рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для решения прямой и обратной задач аэродинамического моделирования на примере профиля крыла NACA2415. Путём обучения нейронной сети на различных выборках, с регулярным и случайным распределением параметров, была достигнута высокая точность (ошибка не более 5%) аппроксимации аэродинамических коэффициентов.

Проведённый анализ показал, что аппроксимация решения прямой задачи с помощью нейронной сети имеет больше преимуществ по сравнению с линейной интерполяцией в случае нерегулярного покрытия области значений исходных параметров.

Решение обратной задачи с использованием нейронных сетей показало, что можно эффективно восстанавливать параметры профиля крыла (такие как максимальный изгиб, толщина) и угол атаки на основе заданных аэродинамических характеристик. Это открывает перспективы для автоматизации процесса оптимизации аэродинамических форм в инженерных приложениях.

Будущие исследования могут быть направлены на дальнейшую оптимизацию архитектуры нейронной сети, использование более сложных моделей и интеграцию с гибридными методами, включая численные расчёты и машинное обучение, для более точного решения задач аэродинамического проектирования.

Библиографический список

1. Rai M.M., Madavan N.K. Aerodynamic design using neural networks // AIAA Journal. – 2000. – Vol. 38, No. 1. – P. 173–182. DOI: 10.2514/2.938
2. Sun G., Sun Y., Wang S. Artificial neural network based inverse design: Airfoils and wings // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 42. – P. 415–428. DOI: 10.1016/j.ast.2015.01.030
3. Sekar V., Zhang M., Shu C., Khoo B.C. Inverse design of airfoil using a deep convolutional neural network // AIAA Journal. – 2019. – Vol. 57, No. 3. – P. 993–1003. DOI: 10.2514/1.J057894
4. Du X., Ren J., Leifsson L. Aerodynamic inverse design using multifidelity models and manifold mapping // Aerospace Science and Technology. – 2019. – Vol. 85. – P. 371–385. DOI: 10.1016/j.ast.2018.12.008
5. Li J., Du X., Martins J.R.R.A. Machine learning in aerodynamic shape optimization // Progress in Aerospace Sciences. – 2022. – Vol. 134. – P. 100849. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100849
6. Samareh J.A. Survey of shape parameterization techniques for high-fidelity multidisciplinary shape optimization // AIAA Journal. – 2001. – Vol. 39, No. 5. – P. 877–884. DOI: 10.2514/2.1391
7. Kulfan B.M. Universal parametric geometry representation method // Journal of Aircraft. – 2008. – Vol. 45, No. 1. – P. 142–158. DOI: 10.2514/1.29958
8. Kharal A., Saleem A. Neural networks based airfoil generation for a given C_p using Bezier–PARSEC parameterization // Aerospace Science and Technology. – 2012. – Vol. 23. – P. 330–344. DOI: 10.1016/j.ast.2011.08.010
9. Jacobs E.N., Ward K.E., Pinkerton R.M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel // NACA Report. – 1933. – No. 460 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930091108/downloads/19930091108.pdf>

MODELING AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A WING AIRFOIL USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Stepanov R.A.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Stepanov R.A. Modeling aerodynamic characteristics of a wing airfoil using artificial neural networks // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 74–79. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.6>

The paper considers the application of artificial neural networks to solve the direct and inverse aerodynamic modeling problems using the example of a two-dimensional NACA2415 wing profile. Based on the numerical solution of the steady-state Navier–Stokes equations, a training dataset is formed, which includes aerodynamic lift and drag coefficients for various values of the geometric parameters and angle of attack. A neural network with two hidden layers of 10 neurons and a sigmoid activation function is built and trained on datasets with regular and random distribution of parameters. The feasibility of solving the inverse problem of recovering the geometric parameters of an airfoil and angle of attack from given aerodynamic coefficients with an error of no more than 5% is demonstrated. The results confirm the effectiveness of neural networks for modeling and inverse design of aerodynamic profiles.

Keywords: artificial neural networks, aerodynamic coefficients, inverse problem, NACA, airfoil.

Сведения об авторе

Степанов Родион Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий 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; e-mail: rodion@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 17.11.2025

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗДАНИЯ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ*

Г.Н. Гусев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Епин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Ф.Д. Сологуб, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В., Сологуб Ф.Д. Деформационный мониторинг здания на многолетнемерзлых грунтах // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 80–86. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.7>

Мониторинг деформированного состояния строительных конструкций в условиях Арктики имеет стратегически важное значение. Массовое применение недорогих измерительных систем и адаптация их к суровым температурным условиям позволит осуществлять контроль за фундаментами зданий при таянии грунтов криолитозоны. В работе показаны этапы адаптации измерительной системы на основе метода гидростатического нивелирования для эксплуатации в северных регионах. Приведено описание элементов системы мониторинга, смонтированной на здании в г. Якутск. Показаны начальные результаты измерений.

Ключевые слова: Арктика, криолитозона, здание, мониторинг, гидростатический нивелир.

Актуальной задачей строительства и эксплуатации зданий является разработка и внедрение методов и средств, обеспечивающих непрерывный мониторинг механического состояния объектов, в том числе расположенных в арктических регионах РФ [1]. Решение этой задачи в условиях Арктики, помимо стандартных проблем при организации долговременных измерений, сопряжено с дополнительными. Главная из них – это воздействие перепада температур окружающего воздуха на эксплуатируемые сооружения (средний

диапазон в течение года от +40°C до -50°C). Однако, наряду с этим, в связи с изменениями климатических условий, в последние десятилетия возникла новая проблема, связанная с таянием многолетнемерзлых грунтов [2-3] и, как следствие, с существенным изменением механических свойств оснований, на которых располагаются здания и инженерные сооружения [4-5]. Данные проблемы свидетельствуют об актуальности темы обеспечения постоянного контроля механического состояния зданий и инженерных

* Работа выполнена в рамках государственного задания (номер темы №124040500016-9).

сооружений, расположенных в Арктической зоне, особенно с учетом изменяющихся свойств грунтов в связи с опусканием горизонта криолитозоны.

У сотрудников коллектива ПФИЦ УрО РАН имеется опыт создания и эксплуатации различных вариантов систем деформационного мониторинга строительных объектов [6-8]. Многие из них имеют в своем составе гидростатические нивелиры, контролирующие неоднородные осадки сооружений с необходимым пространственным разрешением. В постоянно меняющихся инженерно-геологических условиях, которые характерны для таяния грунтов криолитозоны, использование таких измерительных средств более чем оправдано. Однако реализация типовых схем мониторинга осуществлялась для климатических условий средней полосы России или внутри теплового контура зданий. В рамках проекта создания молодежной лаборатории «Интеллектуального мониторинга» на базе ПФИЦ УрО РАН (г. Пермь) были поставлены задачи адаптации систем деформационного мониторинга к суровым арктическим условиям и опытной эксплуатации с целью выявления и решения возникающих проблем.

Первой задачей являлся подбор подходящих материалов для элементов системы мониторинга, а также организации процесса непрерывных измерений и рабочих условий для оборудования. Необходимо было учесть специфические конструктивные особенности зданий в условиях криолитозоны, большинство из которых имеют возвышающийся над поверхностью земли свайный фундамент, острия свай его оперты на многолетнемерзлые грунты. Вытекающей из этого конструктивной особенностью сооружений является отсутствие цокольных и подвальных помещений – пространство под зданием защищено от прямых солнечных лучей, но вентилируется окружа-

ющим арктическим воздухом, что замедляет процессы оттаивания. Данное обстоятельство, с одной стороны, существенно упрощает и ускоряет монтаж элементов системы мониторинга непосредственно на стволы свай под зданием для контроля их вертикальных перемещений. С другой стороны, сильно затрудняет монтаж гидростатических нивелиров внутри теплового контура здания. Однако отрицательные температуры накладываю серьезные ограничения на материалы датчика-нивелира. Так, например, от проверенных временем ПВХ гидролиний пришлось отказаться и использовать силиконовые, пригодные к использованию при температурах до -60°C . Это, в свою очередь, повлекло за собой отказ от масел на силиконовой основе (типа ПМС-1.5), имеющих подходящие параметры вязкости в области низких температур ввиду негативных химических процессов взаимодействия силиконовых элементов системы гидролиний и неконтролируемых изменений механических свойств контуров сообщения датчиков. Была найдена альтернатива гидронивелировочной жидкости в виде водных растворов гликолей. Окончательный выбор был сделан в пользу нетоксичного 65% раствора пропиленгликоля. Данный раствор имеет температуру кристаллизации около -60°C и не вступает в химическую реакцию с силиконовыми гидролиниями, однако обладает более высокой вязкостью, чем силиконовые масла.

Диапазон работы электронных компонентов датчиков, как правило, регламентируется температурами выше -40°C , что также потенциально может повлиять на работоспособность при существенно более низких температурах. Поэтому часть электронных устройств (таких как устройства сбора данных и коммутации) следовало разместить внутри теплового контура помещений. Для модулей датчиков-гидро-

нивелиров, находящихся вне теплового контура, следовало предусмотреть подсистему обогрева. Планируемые к установке элементы системы (компоненты датчиков и электронные модули) были протестированы в климатической камере Института механики сплошных сред УрО РАН при температуре -45°C и показали свою работоспособность.

Для опытной эксплуатации оборудования в 2025 г. был осуществлен монтаж системы деформационного мониторинга на здание «Института физико-техниче-

ских проблем севера им. В.П. Ларионова» в г. Якутск. Данное сооружение является сборной железобетонной каркасной строительной конструкцией на свайном основании с высоким ростверком (рис. 1). Острия 10-ти метровых свай оперты на многолетнемерзлые грунты, горизонт которых неуклонно снижается в последние десятилетия. Здание построено в 1978 году и как многие строительные объекты в такого рода условиях нуждается в непрерывном деформационном мониторинге.



Рис. 1. Объект мониторинга

Основным измерительным средством, осуществляющим контроль за процессами неравномерной осадки здания, является подсистема гидростатического нивелирования из 10 датчиков-нивелиров, размещенная на элементах фундамента здания. Также осуществляется контроль температуры и наклона стен внутри здания. Показания со всех устройств передаются по линиям связи на устройство сбора данных, расположенное внутри теплового контура здания (рис. 2) и далее по сети Интернет передаются на сервер. Устройство сбора данных содержит в себе источники питания датчиков и подсистемы обогрева, коммутатор для связи с устройствами по Ethernet, конвертер сигналов по шине

RS-485, модуль аналогового ввода Owen MB110 для опроса термодатчиков. «Мозгом» системы является локальная рабочая станция под управление операционной системы Linux, которая осуществляет опрос всех типов датчиков: запись, обработку, архивирование и передачу данных на удаленный сервер, который находится на территории ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь.

Для подсистемы гидронивелирования был разработан измерительный модуль датчика, жестко закрепляемый на фундаментах конструкции. Он содержит в себе измерительную трубку с жидкостью, шкалу и ip-камеру. Данный подход хорошо себя зарекомендовал и использовался во многих проектах [6,7].



Рис. 2. Устройство сбора данных

Положение мениска относительно маркеров и шкалы позволяет отслеживать уровень жидкости в измерительном сосуде. Изменение относительной разности уровней жидкости во всех сосудах относительно выбранного базового позволяет получать картину распределения относительных осадок сооружения. Изображение, получаемое с камеры устройства, представлено на рис. 3. Стоит отметить, что в текущую версию модуля датчика-нивелира встроен датчик температуры (красный столб в правой части кадра), для визуального контроля работоспособности устройства.



Рис. 3. Типовое изображение с камеры датчика-гидронивелира

Модуль гидронивелира закрыт защитным металлическим коробом, утепленным снаружи термоизоляционным материалом. Внутри на металлической части корпуса расположен нагревательный элемент с радиатором, который при необходимости может включаться в работу. Начальные измерения при температуре -35°C показали, что данное решение обеспечивает температуру внутри модуля на 12-15 градусов выше окружающей среды, что теоретически достаточно для примененных электронных устройств.



Рис. 4. Внешний вид модуля системы гидронивелирования

Внешний вид модуля датчика-гидронивелира, размещенного на фундаменте здания, показан на рис. 4. С двух сторон к нему подходят гидролинии системы и линии связи, обеспечивающие питание и передачу данных. Измерительные элементы системы размещены с внутренней части фундамента здания, чтобы исключить попадание прямых солнечных лучей на датчики и гидролинии. Всего на фундаментные конструкции было установлено 10 измерительных модулей. В гидросистему встроен расширительный бак емкостью 10 литров, для компенсации теплового расширения в системе.

Монтаж системы был завершен в начале октября 2025 года, при температуре окружающего воздуха около нуля градусов Цельсия. С этого времени начался процесс измерений и обработки показаний датчиков системы. На рисунках ниже представлены первые результаты.

На рис. 5 представлено изменение температуры воздуха под зданием (x1)

и внутри двух модулей датчиков-гидронивелиров. Видно, что за полтора месяца температура снизилась до -35°C . До включения подогрева 24.11.2025 г., температуры внутри модулей были выше температуры окружающей среды на несколько градусов. После включения обогрева разница стала составлять $10-15^{\circ}\text{C}$.

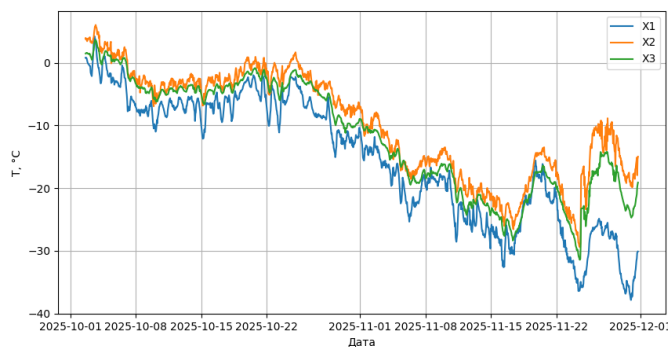


Рис. 5. Изменение температуры воздуха (1) и датчиков (2-3)

На рис. 6 представлены изменения уровня жидкости в датчиках. Несмотря на наличие бака, расположенного около датчика №1, наблюдается снижение уровня жидкости во всех датчиках, связанное со снижением температуры окружающего воздуха. Происходят колебания уровней жидкости в измерительных сосудах в течение дня, наиболее заметные на датчиках, расположенных на удалении от расширительного бака. Это связано с перетоком жидкости внутри гидролиний системы под воздействием неравномерно

меняющегося внешнего поля температур. Следует отметить увеличение амплитуды пульсаций с уменьшением температуры окружающего воздуха. Это связано с увеличением вязкости гидронивелировочной жидкости, которой требуется больше времени для установления в положении гидростатического равновесия. Однако практический интерес представляет не сам уровень жидкости, а разность его значений во времени, которая показывает вертикальные смещения (осадку) фундаментов относительно одного из датчиков.

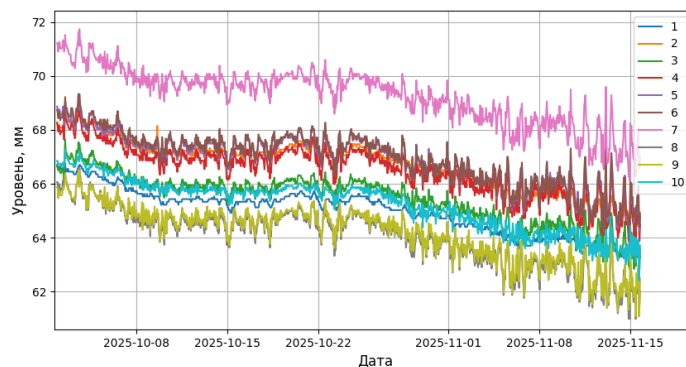


Рис. 6. Изменение уровня жидкости в датчиках

На рис. 7 показаны графики усредненных значений вертикальных перемещений (осадки) всех датчиков относительно датчика №1. Видно, что в текущий момент измерений неравномерной осадки здания практически не наблюдается. Зимние условия являются идеальным тестом для проверки измерительного оборудования. В такого рода условиях оно должно де-

монстрировать работоспособность и стабильность измерений. Дальнейшие измерения, в том числе в период положительных температур, позволят оценить температурное влияние на осадку сооружения.

В статье приведены основные этапы создания системы деформационного мониторинга, адаптированного к условиям работы в северных регионах.

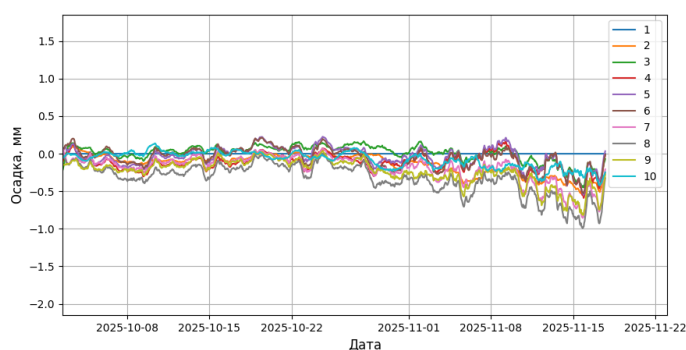


Рис. 7. Осадка датчиков относительно датчика №1

Библиографический список

1. Уставич Г.А., Аврунев Е.И., Сальников В.Г., Попов В.К. Особенности выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 97–109.
2. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 15-30. – [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)).
3. Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера земли. – 2017. – Т. 21. – №6. – С. 26 – 34.
4. Емельянова И.А. Основные причины деформаций зданий и сооружений городов криолитозоны // Литосфера. – 2011. – № 3. – С. 144-149.
5. Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Ключев С.В., Саденко Д.С. Из опыта экспертизы конструкций зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4(53). – С. 66-74. – https://doi.org/10.54734/20722958_2022_4_66.
6. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Glot I., Epin V. Dynamic processes in hydrostatic leveling systems with various configuration and fluid properties // Procedia Structural Integrity. –2021– Vol. 32. – P. 209-215. – <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.030>.
7. Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д. Анализ деформационного поведения надшахтной конструкции в условиях таяния грунтов основания // Горная промышленность. – 2025. – № S4. – С. 23-26. – <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-23-26>.
8. Tsvetkov R.V., Lekomtsev S.V., Yepin V.V. Temperature error in a hydrostatic leveling system and its reduction // Structural Control and Health Monitoring. – 2021. – Vol. 28, No. 2. – P. e2668. – <https://doi.org/10.1002/stc.2668>.

DEFORMATION MONITORING OF BUILDINGS ON PERMAFROST SOILS

Gusev G.N., Epin V. V., Tsvetkov R.V., Sologub F.D.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Gusev G.N., Epin V. V., Tsvetkov R.V., Sologub F.D. Deformation monitoring of buildings on permafrost soils // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 80–86. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.7>

Monitoring the deformation state of building structures in Arctic conditions is of strategic importance. Widespread use of inexpensive measuring systems and their adaptation to harsh temperature conditions will make it possible to monitor the foundations of buildings during the melting of cryolithozone soils. The paper describes the stages of adapting a hydrostatic leveling-based measuring method for the use in northern regions. The description of the monitoring system elements mounted on a building in Yakutsk is provided. Initial measurement results are presented.

Keywords: Arctic, building, permafrost, monitoring, hydrostatic level.

Сведения об авторах

Гусев Георгий Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга, 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: gusev.g@icmm.ru

Епин Валерий Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: epin.v@icmm.ru

Цветков Роман Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: flower@icmm.ru

Сологуб Федор Денисович, инженер-исследователь лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: sologub.f@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 05.12.2025

ПАССИВНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА*

С.В. Лекомцев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Лекомцев С.В. Пассивное демпфирование колебаний пластины из функционально-градиентного материала // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 87–93. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.8>

Использование функционально-градиентных материалов в smart-системах на основе пьезоэлементов позволяет получить ряд дополнительных преимуществ по сравнению с однородными металлами и сплавами. Гладкое изменение механических характеристик конструкции вдоль одного или нескольких направлений предоставляет возможность оптимизации её динамических параметров на этапе проектирования при заданных ограничениях на габариты и массу изделия. В данной работе с применением метода конечных элементов исследованы собственные и вынужденные установившиеся гармонические колебания прямоугольной функционально-градиентной пластины с пьезоэлектрическим элементом, соединённым с внешней электрической RL -цепью. В примерах проанализировано влияние показателя объёмной доли функционально-градиентного материала на коэффициент электромеханической связи, собственные частоты и амплитуду колебаний. Показана возможность их изменения в пределах, достаточных для безопасной эксплуатации конструкции в окрестности первоначального резонанса.

Ключевые слова: *собственные колебания, пьезоэлементы, электрическая цепь, метод конечных элементов.*

Введение

Современные машиностроительные конструкции эксплуатируются в условиях интенсивных внешних воздействий различной природы: механических, температурных, центробежных, аэро- или гидродинамических. Необходимость их

безопасного использования накладывает повышенные требования на прочностные характеристики изделий, достичь которых возможно с применением функционально-градиентных материалов (ФГМ) [1]. Их концепция была впервые предложена ещё в 1970-х годах, но практическое во-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124020700047-3) и в процессе реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 года (задачи пассивного демпфирования колебаний).

площадь она получила лишь в следующем десятилетии во время разработки японскими учёными теплозащитных покрытий для аэрокосмической промышленности [2]. Возможность плавного изменения состава или структуры материала вдоль определённого направления позволяет на этапе проектирования оптимизировать его, чтобы обеспечить необходимые прочностные и жаропрочные свойства конструкции для конкретных условий нагружения. Сочетание в одном композите преимуществ керамики, металлов и даже органических соединений делает возможным использование ФГМ в атомной [1], аэрокосмической [2–4] и энергетической [4] промышленности, металлообработке [5], биомедицине [6], строительстве [7, 8].

Особую значимость в авиационно-космической технике имеет проблема управления вибрациями, поскольку широко используемые тонкостенные элементы летательных аппаратов критически уязвимы к резонансным явлениям. Традиционные пассивные методы виброзащиты и демпфирования зачастую недостаточны или ведут к неоправданному утяжелению конструкции. В настоящее время в литературе активно освещается ещё один способ пассивного подавления колебаний [9, 10]. Он основан на прикреплении к поверхности тела пьезоэлементов и подключении к ним внешних электрических цепей. Ключевые идеи данной техники были заложены ещё во второй половине XX века [11], но только в последние десятилетия современные электронные компоненты позволили раскрыть её потенциал. На сегодняшний день существует множество конфигураций электрических цепей, предназначенных для шунтирования пьезоэлементов: после-

довательные, параллельные и каскадные RL -цепи, цепи с отрицательной ёмкостью, переключаемые цепи и другие [10].

Функционально-градиентные материалы открывают широкие возможности для создания конструкций с регулируемой жёсткостью и спектром собственных частот колебаний за счёт подбора состава материала. Их применение в smart-системах на основе пьезоэлементов позволяет получить дополнительные преимущества относительно традиционных металлов и сплавов, некоторые из которых продемонстрированы в данной работе с помощью численного моделирования. В приведённых ниже примерах рассматриваются колебания жёстко закреплённой по всем краям прямоугольной пластины размерами $150 \times 115 \times 0.92$ мм (длина \times ширина \times толщина) из функционально-градиентного материала, представляющего собой комбинацию сплавов титана Ti-6Al-4V и алюминия Д16Т. По центру пластины располагается прямоугольный пьезокерамический элемент ЦТС-19 ($50 \times 20 \times 0.3$), подключённый к пассивной электрической RL -цепи, состоящей из последовательно соединённых сопротивления (R) и катушки индуктивности (L).

Математическая постановка

Собственные и вынужденные установившиеся гармонические колебания кусочно-однородного тела объёмом $V = V_s \cup V_p$, состоящего из упругой (V_s) и пьезоэлектрической областей (V_p), описываются вариационными уравнениями (1) и (2). Они формулируются известным образом на основе трёхмерных соотношений линейной теории упругости и электроупругости [12, 13].

$$\begin{aligned}
 & -\lambda^2 \int_V \delta \mathbf{d}^T \rho \mathbf{d} dV + i\lambda \int_V \delta \mathbf{d}^T \boldsymbol{\mu} \mathbf{d} dV + \int_V (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} - \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{e} \mathbf{E} - \delta \mathbf{E}^T \mathbf{e}^T \boldsymbol{\varepsilon} - \delta \mathbf{E}^T \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E}) dV - \\
 & - \frac{1}{\lambda^2 L} \Delta \varphi_L \delta \varphi + \frac{1}{i\lambda R} \Delta \varphi_R \delta \varphi = 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & -\Omega^2 \int_V \delta \mathbf{d}^T \rho \mathbf{d} dV + i\Omega \int_V \delta \mathbf{d}^T \boldsymbol{\mu} \mathbf{d} dV + \int_V (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} - \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{e} \mathbf{E} - \delta \mathbf{E}^T \mathbf{e}^T \boldsymbol{\varepsilon} - \delta \mathbf{E}^T \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E}) dV - \\
 & -\frac{1}{\Omega^2 L} \Delta \varphi_L \delta \varphi + \frac{1}{i\Omega R} \Delta \varphi_R \delta \varphi = \int_{S_\sigma} \delta \mathbf{d}^T \mathbf{f}_{sf} dS.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь: $\lambda = \omega + i\gamma$ – характеристический показатель; ω – собственная частота колебаний; γ – величина, отвечающая за демпфирование системы; i – мнимая единица; Ω – частота внешнего гармонического воздействия; \mathbf{d} – вектор перемещений; ρ – плотность материала кусочно-однородного тела; $\boldsymbol{\mu}$ – матрица, содержащая коэффициенты демпфирования; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор, содержащий компоненты тензора малых деформаций; \mathbf{C} – матрица упругих констант; $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$ – вектор напряжённости электрического поля; φ – электрический потенциал; \mathbf{e} и $\boldsymbol{\varepsilon}$ – матрицы пьезоэлектрических и диэлектрических коэффициентов; L – индуктивность элемента электрической цепи; R – сопротивление элемента электрической цепи; $\Delta\varphi_L$ и $\Delta\varphi_R$ – разность потенциалов на индуктивном и резистивном элементах электрической цепи; \mathbf{f}_{sf} – вектор поверхностной нагрузки, действующей на границе S_σ . В упругой области V_s третий интеграл в уравнениях (1) и (2) содержит только первое слагаемое.

Эффективные модуль упругости E_{eff} , коэффициент Пуассона ν_{eff} , плотность ρ_{eff} и другие характеристики функционально-градиентного материала определяются свойствами его составляющих и их объёмными долями. При наличии всего двух компонент (например, металла « m » и керамики « c ») используется следующее выражение

$$P_{\text{eff}}(z) = P_m + (P_c - P_m) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^N \tag{3},$$

где P_{eff} – характеристика материала (E_{eff} , ν_{eff} , ρ_{eff} и др.); N – показатель объёмной доли, изменяющийся от нуля до бесконечности; h – толщина пластины.

Уравнения (1) и (2) совместно с граничными условиями преобразуются к матричному виду с использованием известных процедур метода конечных элементов. После выполнения всех операций окончательно получим [13]

$$\left(-\lambda^2 \mathbf{M} + i\lambda \boldsymbol{\Gamma} + \mathbf{K} - \frac{1}{\lambda^2 L} \mathbf{Z}_L + \frac{1}{i\lambda R} \mathbf{Z}_R \right) \mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{4}$$

$$\left(-\Omega^2 \mathbf{M} + i\Omega \boldsymbol{\Gamma} + \mathbf{K} - \frac{1}{\Omega^2 L} \mathbf{Z}_L + \frac{1}{i\Omega R} \mathbf{Z}_R \right) \mathbf{u} = \mathbf{r} \tag{5},$$

где \mathbf{M} – матрица масс, \mathbf{K} – матрица жёсткости, $\boldsymbol{\Gamma} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$ – матрица демпфирования, α и β – коэффициенты пропорциональности, $\mathbf{u} = \{\mathbf{d}, \varphi\}^T$ – вектор обобщённых узловых неизвестных; $\mathbf{r} = \{\mathbf{f}_{sf}, \mathbf{0}\}^T$ – вектор механической и электрической нагрузок. Матрицы \mathbf{Z}_L и \mathbf{Z}_R содержат только коэффициенты 1 и -1 в позициях, соответствующих узловым значениям электрического потенциала конечных элементов электрической цепи. Значения коэффициентов α и β вычисляются на основе собственных частот и коэффициентов демпфирования двух фундаментальных мод колебаний, которые находятся экспериментально. В данной работе полагается $\alpha = 0$ Гц и $\beta = 1 \times 10^{-5}$ с.

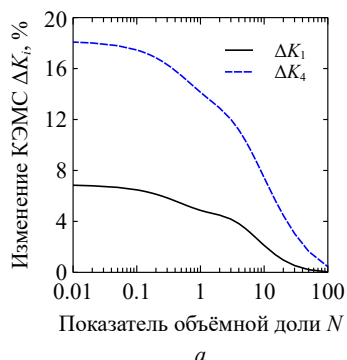
Дискретизация пластины и пьезоэлектрического элемента осуществляется 20-узловыми конечными элементами в форме призмы с квадратичной аппроксимацией всех компонент вектора перемещений и электрического потенциала. Параметры конечно-элементной сетки определяются из условия асимптотической сходимости собственных частот колебаний при увеличении числа узловых неизвестных.

Моделирование функционально-градиентного материала пластины выполняется следующим образом. В рассмотрение вводится k слоёв толщиной $h_k = h/k$, в каждом из которых характеристики считаются постоянными. Их значение вычисляется по выражению (3) в середине каждого слоя ($z_k = h_k/2$).

Результаты расчётов

В первом примере рассмотрена задача о собственных колебаниях прямоугольной пластины с пьезоэлементом без электрической цепи. Эффективность его работы на i -ой частоте характеризуется коэффициентом электромеханической связи K_i (КЭМС) [11]

$$K_i = \sqrt{\left(\frac{\omega_i^{o/c}}{\omega_i^{s/c}}\right)^2 - 1},$$



где $\omega_i^{o/c}$ и $\omega_i^{s/c}$ – собственные частоты колебаний системы с разомкнутыми (o/c) и замкнутыми (s/c) электродами на пьезоэлементе.

Варьируя показатель объёмной доли N , можно обеспечить плавное изменение свойств ФГМ по толщине конструкции по степенному закону. Анализ результатов моделирования показал, что наличие более жёсткой составляющей (Ti-6Al-4V) на внешней поверхности пластины приводит к повышению КЭМС (Рис. 1а, $N=0.01$). Приведённые здесь количественные оценки получены с помощью следующих выражений: $\Delta K_i = (\tilde{K}_i - K_i) / \tilde{K}_i$, $\Delta \omega_i^{o/c} = (\tilde{\omega}_i^{o/c} - \omega_i) / \tilde{\omega}_i^{o/c}$, где \tilde{K}_i и $\tilde{\omega}_i^{o/c}$ – коэффициенты электромеханической связи и собственные частоты колебаний, полученные при $N = \infty$ (конструкция полностью изготовлена из материала меньшей жёсткости).

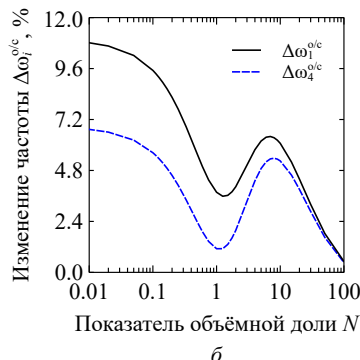


Рис. 1. Влияние показателя объёмной доли N функционально-градиентного материала на коэффициент электромеханической связи (а) и собственные частоты колебаний (б)

Повышение коэффициента электромеханической связи для первой моды колебаний составляет около 7%. Данный эффект проявляется значительно сильнее для более высоких мод, о чём свидетельствует увеличение K_4 на 18%. Противоположная картина наблюдается для собственных частот (Рис. 1б). Низшая из них является более чувствительной к изменению показателя объёмной доли N . Отличительной особенностью приведённых зависимостей является немонотонный характер, который необходимо учитывать при подборе материала конструкции под требуемый диапазон частот.

Второй пример посвящён пассивному демпфированию резонансных колебаний функционально-градиентной пластины с помощью пьезоэлемента, шунтированного последовательной электрической RL -цепью. Значения сопротивления и индуктивности, обеспечивающие наименьшую амплитуду колебаний, определяются с помощью аналитических выражений, полученных в работе [11] на основе передаточных функции одномассовой системы. Известно, что точность этих формул снижается при демпфировании высокочастотных мод колебаний или в случае плот-

ного спектра [14]. Тем не менее, они позволяют получить приемлемое начальное приближение для нахождения параметров электрической цепи, обеспечиваю-

щих наименьшую амплитуду колебаний. Не затрагивая вопрос их оптимальности, приведём на рисунке 2 некоторые результаты в качестве примера.

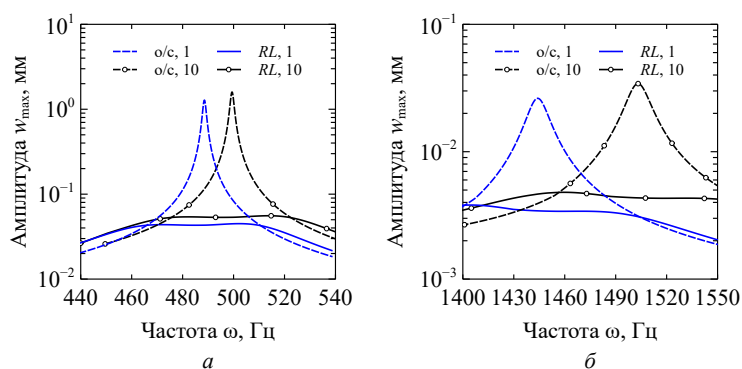


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики в окрестности первого (а) и четвёртого (б) резонансов, полученные при $N = 1$ и $N = 10$

Изображённые амплитудно-частотные характеристики демонстрируют:

- смещение резонансных пиков и, следовательно, собственных частот колебаний при изменении показателя объёмной доли N функционально-градиентного материала пластины;
- снижение амплитуды нормальных перемещений w_{\max} за счёт повышения жёсткости конструкции, которое достигается путём увеличения объёмной доли титанового сплава (при $N = 0$ пластина полностью изготовлена из Ti-6Al-4V);
- снижение амплитуды резонансов при шунтировании пьезоэлемента последовательной электрической RL -цепью.

Выводы

Возможность плавного изменения состава функционально-градиентного материала вдоль заданного направления

позволяет на этапе проектирования конструкции оптимизировать её таким образом, чтобы обеспечить необходимые динамические характеристики для конкретных условий эксплуатации. В данном исследовании такая возможность продемонстрирована на примере изменения коэффициента электромеханической связи и собственных частот колебаний, а также в задачах пассивного демпфирования колебаний с помощью шунтированного электрической RL -цепью пьезоэлемента. Отметим также, что с помощью функционально-градиентного материала можно снизить концентрацию механических напряжений около пьезоэлектрических элементов, что способствует повышению надёжности клеевого соединения и увеличению долговечности в условиях знакопеременного динамического нагружения.

Библиографический список

1. Ma Z. et. al. Additive manufacturing of functional gradient materials: A review of research progress and challenges // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 971. – № 15. – Article № 172642. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172642>
2. Koizumi M. FGM activities in Japan // Composites Part B: Engineering. – 1997. – Vol. 28. – № 1–2. – P. 1–4. [https://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9)
3. Gupta A., Talha M. Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures // Progress in Aerospace Sciences. – 2015. – Vol. 79. – P. 1–14. <https://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.07.001>

4. *Boggarapu V., Gujjala R., Ojha S., Achary S., Venkateswara B.P., Chowdary S., Gara D.K.* State of the art in functionally graded materials // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 262. – Article № 113596. <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113596>
5. *Cho J.R., Park H.J.* High strength FGM cutting tools: finite element analysis on thermoelastic characteristics // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 130–131. – P. 351–356. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00823-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00823-3)
6. *Pompe W., Worch H., Epple M., Friess W., Gelinsky M., Greil P., Hempel U., Scharnweber D., Schulte K.* Functionally graded materials for biomedical applications // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 362. – № 1–2. – P. 40–60. [https://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00580-X](https://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00580-X)
7. *Torelli G., Fernández M.G., Lees J.M.* Functionally graded concrete: Design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 242. – Article № 118040. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118040>
8. *Tay Y.W.D., Lim J.H., Li M., Tan M.J.* Creating functionally graded concrete materials with varying 3D printing parameters // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2022. – Vol. 17. – № 3. – P. 662–681. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2048521>
9. *Moheimani S.O.R., Fleming A.J.* Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1st ed. – London: Springer, 2006. – 287 p. <https://doi.org/10.1007/1-84628-332-9>
10. *Gripp J.A.B., Rade D.A.* Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 112. – P. 359–383. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.041>
11. *Hagood N.W., von Flotow A.H.* Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks // *Journal of Sound and Vibration*. – 1991. – Vol. 146. – № 2. – P. 243–268. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90762-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90762-9)
12. *Партон В.З., Кудрявцев Б.А.* Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. – М: Наука, 1988. – 472 с.
13. *Ошмарин Д.А.* Моделирование демпфирования колебаний SMART-систем на основе пьезоэлектрических материалов и электрических элементов / Дисс. канд. физ.-мат. наук: 1.1.8. – Пермь, ИМСС УрО РАН, 2022. – 139 с.
14. *Matveenko V.P., Iurlova N.A., Oshmarin D.A., Sevodina N.V., Iurlov M.A.* An approach to determination of shunt circuits parameters for damping vibrations // *International Journal of Smart and Nano Materials*. – 2018. – Vol. 9. – № 2. – P. 135–149. <https://doi.org/10.1080/19475411.2018.1461144>

PASSIVE VIBRATION DAMPING OF A PLATE MADE OF FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL

Lekomtsev S.V.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Lekomtsev S.V. Passive vibration damping of a plate made of functionally graded material // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2025. – № 4. – P. 87–93. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.8>

The use of functionally graded materials in smart systems based on piezoelectric elements provides a number of additional advantages over homogeneous metals and alloys. Smooth variation of the mechanical properties of a structure along one or more directions makes it possible to optimize its dynamic parameters at the design stage, within the given constraints on the dimensions and mass of the structure. In this paper, the finite element method was

used to study the free and forced steady-state harmonic vibration of a rectangular functionally graded plate with a piezoelectric element connected to an external electrical RL circuit. The examples analyze the influence of the volume fraction index of the functionally graded material on the electromechanical coupling coefficient, natural frequencies and vibration amplitude. The possibility of varying them within limits sufficient for safe operation of the structure in the vicinity of the initial resonance is demonstrated.

Keywords: natural vibration, piezoelectric elements, electric circuit, finite element method.

Сведения об авторе

Лекомцев Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией механики функциональных материалов, 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: lekomtsev@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 08.12.2025

ИЗ ИСТОРИИ РОДНОГО КРАЯ



**Городище «Анюшкар», Ильинский городской округ, 2025 г.
Фото Крыласовой Н.Б.**

ГОРОДИЩЕ АНЮШКАР – ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ НОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Н.Б. Крыласова, *Институт гуманитарных исследований УрО РАН*

Для цитирования:

Крыласова Н.Б. Городище Анюшкар – задачи и перспективы новых исследований // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 95–106. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.9>

К числу наиболее известных и наиболее хорошо изученных археологических памятников Пермского края принадлежит городище Анюшкар – единственное, имя которого известно, благодаря преданиям коми-пермяков... Оно возвышается на берегу Камского водохранилища возле д. Кыласово и представляет собой весьма живописное и знаковое место. Это городище, занимавшее выгодное стратегическое положение неподалеку от впадения р. Иньвы в Каму, во времена своего расцвета было болгарской торгово-ремесленной факторией. О проживании здесь болгар свидетельствует наличие мусульманского могильника. На городище обнаружены разнообразные ремесленные мастерские, жилища, оборонительные сооружения. В процессе раскопок собраны богатые выразительные материалы, свидетельствующие об особенностях бытового уклада, хозяйственной и производственной деятельности жителей городища, об их культурно-экономических связях. Однако результаты исследований городища очень мало освещены в публикациях, а полученные материалы по большей части не введены в научный оборот. С 2024 г. городище стало объектом исследования сотрудников ИГИ УрО РАН. Во-первых, памятник требует срочных аварийно-спасательных работ, поскольку стремительно разрушается водохранилищем. Во-вторых, требуется уточнение некоторых выводов, сделанных предыдущими исследователями, с учетом новых знаний и методик с применением междисциплинарного подхода. Продолжение исследований данного городища обусловлено и тем, что приоритетным направлением в исследованиях археологов ИГИ УрО РАН является изучение технологии средневековых ремесел, а на Анюшкаре можно получить множество дополнительных данных для развития этой темы. Конечной целью является сбор разрозненных данных о предыдущих исследованиях, дополнение их новой информацией для подготовки масштабной публикации, которой, безусловно, заслуживает этот знаковый для Пермского края археологический памятник.

* Работа выполнена в рамках государственного задания «Этнокультурные процессы в центре Евразии: археология и этнография Урала» № 124021500047-2.

Ключевые слова: археология, эпоха Средневековья, Пермский край, городище Анюшкар, история изучения, ломоватовская культура, родановская культура, ремесло, торговля.

В богатейшем археологическом наследии Пермского края особо выделяются средневековые материалы, неизменно привлекающие внимание исследователей.

Пермское Предуралье находилось далеко от крупных центров цивилизации того времени, но жители его не оставались в стороне от политических событий Восточной Европы. Здесь не сложилось государства, но эти земли, по мнению исследователей, принадлежали к периферии Волжской Булгарии – крупного феодального государства в Волго-Камье.

По представлениям болгар, к северу от них – в зоне «седьмого климата» (по арабской географической классификации), – находилось три области: страна и народ Вису (Ису), за ней – страна и народ Юра (Йура), а еще севернее – страна Мрака [1, 140-141]. Сведения об этих северных соседях Булгарии есть у Ибн Фадлана (X в.), Вису упоминали Бируни (XI в.), ал-Марвази (к. XI – н. XII в.), ал-Гарнати (XII в.) [2, 31-32]. Большинство современных археологов локализует Вису в Верхнем Прикамье и сопоставляет с ломоватовской археологической культурой (VII-XI вв.) [3, 64; 4, 2, 33]. С этим утверждением соотносятся и выводы географов, Е.В. Ястребовым по источникам X-XIII вв. восстановлена карта 7-го климата, где Вису помещена в Прикамье [5].

С XII в., когда, по современным представлениям, ломоватовская археологическая культура в Пермском Предуралье сменилась родановской, в письменных источниках вместо страны и народа Вису появились упоминания страны Чулман (Чулыман) и народа Чулманского. Страна и народ Вису/Чулман в письменных источниках фигурируют как крупнейшие торговые партнеры болгар [6, 167].

А.М. Белавин придерживался точки зрения, что с XI в. Прикамье стало угрофинской периферией Волжской Булгарии [6, 163; 7, 120]. Основываясь на сообщениях ал-Гарнати, он подчеркивал тот факт, что страны Вису и Чулман входили в состав Булгарии, их население платило поземельный и подушный налоги – харадж и джизью [4, 169]. У Ибн Фадлана есть указания на наличие между царем Волжской Булгарии и народом Вису дипломатической переписки, возможность существования которой подтверждается находками на городищах Пермского Предуралья писал-стилосов [8, 33].

А.М. Белавин отмечал, что со временем «торговые контакты переросли в систему торгово-политических отношений, стали возможны не только визиты купцов, но и проживание болгарских ремесленников и торговцев на некоторых крупных поселениях» [9, 28], и считал, что «развитие системы дальних и ближних торговых путей, в особенности, путей дальней транзитной торговли, стало основным фактором процесса урбанизации в землях средневожских и приуральских финно-угров» [10, 120]. По его мнению, упомянутые в источниках городки Афкула, Ыбыр и Чулман были торгово-ремесленными факториями в пределах земли Вису-Чулыман, служившими опорными пунктами сбора налогов и контроля над торговцами на Камском торговом пути [6, 163; 11, 7]. Такие фактории он выделял на ряде крупных финно-угорских городищ – Анюшкар, Саламатовском, Рождественском.

На крупнейшем из этих городищ – Рождественском – в течение многих лет силами сотрудников ИГИ УрО РАН и Камской археолого-этнографической экспедиции Пермского государственного гуманитарно-педа-

гогического университета (КАЭЭ ПГГПУ) проводились стационарные полевые исследования. В ходе этих работ существенно уточнены представления об особенностях жилищ, планировке, характере оборонительных сооружений городища, получены ценные данные, касающиеся особенностей средневековых ремесел, организации хозяйства и быта, об отдельных категориях предметов материальной культуры. Немаловажное значение имеет и изучение межэтнических и межконфессиональных контактов населения средневекового городка, известного по письменным источникам как городок «Афкула».

Сейчас Рождественское городище – самый изученный археологический памятник Пермского края, где вскрыто уже более 5,5 тыс. м² площади. Результаты его исследований освещены в многочисленных публикациях и, безусловно, еще долго будут продолжать осмысливаться и использоваться для решения разнообразных исследовательских задач.

А раньше наиболее «раскопаным» памятником считалось городище Анюшкар возле д. Кыласово Ильинского городского округа Пермского края – еще одно, где предполагается наличие торгово-ремесленной фактории булгар. На материалах исследований этого городища во многом основана кандидатская диссертация известного пермского археолога В.А. Оборина «Коми-пермяки в IX-XV вв. (Родановская культура)». Он привлекал

эти материалы и для подготовки обобщающих работ по археологии Прикамья [12; 13; 14]. Собственно результаты раскопок данного памятника в 1950-х гг. кратко представлены в статьях О.Н. Бадера и В.А. Оборина, посвященных работам Камской археологической экспедиции [15; 16; 17], а в 1989-1990 гг. – в статье Г.Т. Ленц и А.А. Терехина [18]. В 2008 г. вышла сравнительно небольшая статья В.А. Оборина и Г.Т. Ленц, обобщающая результаты всех проведенных на Анюшкаре работ [19]. Но в целом богатейшие материалы, полученные в ходе раскопок городища, остаются по большей части не опубликованными.

До создания в 1956 г. Камского водохранилища городище Анюшкар находилось на правом берегу р. Иньвы в 6 км от ее впадения в р. Каму. Мыс высотой 12-14 м, на котором расположено городище, отделяла от берега широкая пойма. Мыс вытянут с северо-запада на юго-восток, где прослеживается высокий дугообразный вал. Общая площадь городища составляет около 16 тыс. м². Сейчас городище стоит непосредственно на берегу водохранилища, воды которого большую часть года подступают вплотную к мысу и постепенно его размывают. Еще одной существенной проблемой становится то, что площадка городища зарастает деревьями. Это хорошо видно при сравнении снимка городища, сделанного в 2008 г. (рис. 1), и современных фотографий (рис. 2-3).



Рис. 1. Городище Анюшкар. Первое фото с воздуха, 2008 г.



Рис. 2. Городище Анюшкар. Раскоп VI 2024 г.



Рис. 3. Городище Анюшкар. Раскопы III и VI 2025 г.

Городище занимало выгодное стратегическое положение. Ниже Анюшкара по р. Иньве на том же берегу находилось ещё два городища – Бородинское и Усть-Иньвенское, а выше на противоположном берегу – Майкор (Туманское городище). Эти городища обеспечивали надежную защиту иньвенской территориальной группы протяженностью до 120 км, включающей около 100 археологических памятников [14, 262].

Городище Анюшкар одно из немногих, название которого сохранилось в устных преданиях коми-пермяков: «А о богатырях старики много рассказывали... На Усть-Иньве есть Анюшкар, чудское городище там есть. Князь Аннюш там жил, богатырь...» [20, 45, №37].

Населенный пункт, возле которого расположено городище Анюшкар, впервые был упомянут в 1579 г. как «починок Анюшкарское городище». Позже названия

деревни варьировались: Анюшкар (1623-1624, перепись М.Ф. Кайсарова), Кыласова (1647). В переписной книге 1711 г. значится погост Кыласовский на р. Иньва с деревянной Никольской церковью. К северо-западу рядом находилась д. Шипицына или Посад. В 1815 г. на месте д. Шипицыной была построена каменная церковь, Кыласово переместилось к церкви [21], а у подножия городища до строительства Камской ГЭС оставалась д. Старый посад. Село до 2020 г. входило в состав Чёрмозского городского поселения Ильинского района, а после упразднения обоих муниципальных образований стало частью Ильинского городского округа. Сейчас в населенном пункте постоянно проживает всего около 120 человек.

В 1933 г. городище обследовал А.В. Шмидт [22], который датировал его X-XIV вв. В 1936 г. небольшие раскопки провел М.В. Талицкий [23, 87]. По его опи-

санию, «Кыласово городище в 1 км от с. Кыласово при дер. Старый Посад на р. Иньве. Огромное по площади городище с хорошо сохранившимся валом. Культурный слой сильно распахан. Кривощеклов пишет, что в 1847 г. на нем была найдена серебряная гривна, вероятно, глазовского типа. Небольшое количество вещей имеется в коллекции Теплоуховых. При наших пробных раскопках в 1936 г. на городище обнаружены остатки жилищ родановского типа, родановский керамический комплекс и другие вещи этого же времени» [23, 94].

Планомерные раскопки городища Анюшкар были начаты в 1951 г. О.Н. Бадером в связи с тем, что памятник попадал в зону подтопления при строительстве Камской ГЭС. В 1952-1955 гг. раскопки продолжались под руководством В.А. Оборина, который в 1952 г. только закончил университет.

За 5 лет работ КАЭ ПГУ на городище было вскрыто 3420 м². Наиболее масштабные исследования проводились у вала городища (раскопы I-III). Были также изучены части площадки в центре городища (раскоп V), ближе к концу мыса (раскоп VI) и на стрелке (раскоп IV). Кроме этого, в 1955 г. через центр площадки и вал были проложены траншеи для выяснения стратиграфии центральной части городища, а на валу разбит небольшой раскоп для изучения оборонительных сооружений.

Исследования городища были возобновлены в 1989 г. под руководством Г.Т. Ленц, в 1990-1991, 1993 гг. – под руководством А.А. Терехина. Но в силу ряда объективных и субъективных обстоятельств отчет был подготовлен только по одному из раскопов 1990 года. В обобщающей статье по итогам исследований городища, написанной Г.Т. Ленц уже после ухода из жизни В.А. Оборина [19], не указана даже точно обобщенная вскрытая площадь памятника.

Поэтому несмотря на то, что памятник существенно разрушается водами Камского водохранилища и давно требует проведения спасательных археологических работ, решиться на это было весьма непросто. Тем не менее, с 2024 г. исследователи ИГИ УрО РАН в сотрудничестве с КАЭЭ ПГПУ, приостановив на время работы на Рождественском археологическом комплексе, переключились на исследование другого знакового для Пермского края памятника – городища Анюшкар.

Предварительно в ходе исследований по выявлению селитебных предпочтений древнего и средневекового населения долины р. Иньвы (при участии сотрудника ИГИ УрО РАН А.Р. Смертина) на основе БПЛА-съемки был составлен новый топографический план территории городища Анюшкар (рис. 4) [24].

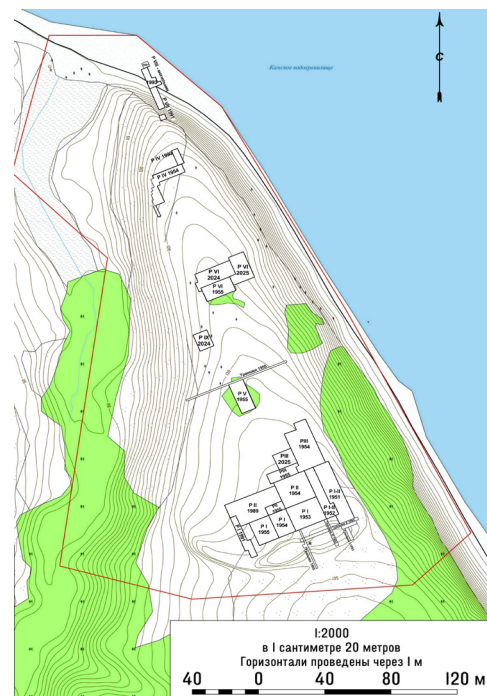


Рис. 4. Топографический план городища Анюшкар

Второй важнейшей задачей стало определение ранее изученной части памятника, для чего потребовались кропотливые архивные изыскания. Студенткой истфака ПГПУ Т. Собяниной на основании полевой документации, сохранившейся в

архиве Музея археологии и этнографии ПГГПУ, установлено, что в 1989 г. работы проводились неподалеку от вала (раскоп II, 360 м²), в 1990 г. – у оконечности мыса (раскоп IV, 40 м²), в 1991 г. – у вала (раскоп I, 124 м²) и на размываемой стрелке мыса (небольшие участки раскопов VII и VIII общей площадью 80 м²), в 1993 г. были продолжены исследования разрушающейся стрелки мыса (раскоп VIII, 72 м²) и проложено 3 траншеи через вал и примыкающий к нему посад (180 м²). В итоге в 1990-х гг. было вскрыто 808 м², а общая изученная площадь памятника достигла 4228 м². На основании полученных данных была составлена схема раскопов, нанесенная впоследствии на топоплан (рис. 4).

При возобновлении работ на городище в 2024 г. было разбито два раскопа общей площадью 372 м², в 2025 г. – два раскопа площадью 324 м², общая изученная площадь памятника достигла 4924 м² (рис. 2-3).

Помимо проведения противоаварийных работ, обращение к исследованиям городища Анюшкар связано с необходимостью проверки некоторых данных, полученных при изучении других одновременных памятников на территории Пермского края, и уточнения выводов, сделанных в свое время В.А. Обориным.

В частности, по В.А. Оборину, на городище было изучено 7 жилищ в виде прямоугольных наземных бревенчатых домов с двухскатной крышей, выступающим перед входом крытым тамбуром, с глинобитным полом и очагом внутри дома. Наиболее ранние жилища, окруженные по периметру канавками, по его описанию, имели площадь 42-60 м² [25, 25; 19, 12].

Но в публикации по раскопкам 1955 г. описано жилище размерами 12 x 7 м (84 м²) [17, 106], параметры которого практически полностью соответствуют современным представлениям о средневековых жилищах Пермского Предуралья – их ширина обусловлена длиной делового бревна

(от 6 до 9 м), и чаще составляет около 7 м, а длина обычно соотносится с шириной как 2 : 1 [26, с.66].

Площадь поздних жилищ В.А. Обориным в разных публикациях называется в 16-20, 16-24, 20-30 м² [25, 25; 14, 264; 19, 12]. Впервые мысль о сокращении площади жилищ на позднем этапе родановской культуры была им высказана еще в известной научно-популярной книге «На заре истории Прикамья», что объяснялось появлением малой семьи вместо патриархальной [12, 202-203], и в дальнейших публикациях уменьшение площади жилищ называлось в числе характерных особенностей родановской культуры. Но при изучении отчетов о раскопках городища Анюшкар выявлена лишь пара построек подобной малой площади, которые в описании даже не получили четкой интерпретации, но послужили основанием для выводов о наличии малых жилищ. Выделены они на основании глинобитного пола [19, 12]. Но как показали дальнейшие исследования, в частности, на Рождественском городище, глинобитный пол нередко сооружался только возле очага, не распространялся под нарами [26, 71], поэтому на основании его площади не корректно реконструировать площадь жилищ.

В 2024 г. на раскопе VI, прирезанном к раскопу В.А. Оборина в 1955 г. (рис. 2), было изучено два жилища. Одно из них шириной ~8, длиной ~16, площадью ~128 м² имело прямоугольную форму, каркасно-столбовую конструкцию, вдоль его продольных границ прослеживалось по паре параллельных канавок. Рядом располагалось жилище аналогичной конструкции и размеров, только без канавок. Оба жилища типичны для ломоватовской культуры. Основной период их функционирования, судя по находкам, пришелся на X-XI вв. Эти жилища можно считать стандартными для средневекового Пермского Предуралья.

Еще один спорный вопрос касается интерпретации культурного слоя городища. Согласно выводам предыдущих исследователей, культурный слой имел среднюю мощность ~1 м, увеличиваясь у вала до 1,5 м и уменьшаясь к концу мыса и западному склону до 0,2-0,3 м. Это полностью подтверждается и раскопками 2024-2025 гг. По наблюдениям В.А. Оборина и Г.Т. Ленц, культурный слой подразделялся на две части: верхний темный рыхлый, нижний – светло-серый плотный, разделенные тонкой прослойкой сгоревшего или сгнившего дерева. Подобная ситуация выявлена и на новых раскопах. Однако В.А. Оборин нижний слой отнес к раннему периоду существования городища и датировал его X – серединой XII вв. на основании находки подражания куфическому дирхему X в., а верхний – серединой XII – началом XV вв. [17, 103; 19, 11; 25, 25]. Но результаты новых работ свидетельствуют, что, к сожалению, всё не так однозначно... В описанном нижнем слое практически отсутствуют находки даже массового материала. Как показали наблюдения на Рождественском городище, где местами зафиксирован подобный слой, его формирование, вероятно, было связано с выравниванием площадки перед возведением новых построек, и он представляет собой глину с незначительной примесью культурного слоя, за счет чего имеет сероватый оттенок, отличающийся от материковой глины. Настоящий культурный слой – темный рыхлый гумусированный суглинок, насыщенный разнообразными находками, в значительной степени перемешан не только за счет многолетней распашки (на участках ближе к стрелке мыса он перепахан на всю глубину), но и за счет перепланировки, разрушения старых и возведения новых объектов различного назначения. В нем присутствуют вещи и керамика, принадлежащие как к ломоватовской, так и к родановской культурам и, как правило, дати-

ровка стратиграфических слоев по находкам невозможна. Более однородный материал представлен в ямах, что позволяет соотнести их с конкретной археологической культурой. Так, на указанном раскопе VI 2024 г., почти полностью занятом двумя ломоватовскими жилищами, были выявлены и ямы, относящиеся к родановской культуре, вероятно, связанные с более поздними постройками, целиком разрушенными пахотой.

На основании предыдущих исследований относительно планировки городища и эволюции его оборонительных сооружений были сделаны следующие выводы:

– Первоначально поселок занимал несколько меньшую площадь, был укреплен невысоким валом и рвом. Остатки этого рва были выявлены на раскопе III 1954-1955 гг., а вал, очевидно, был почти полностью срыт [17, 107]. Жилища располагались рядами вдоль рва перпендикулярно к нему. Вновь выявленные жилища соответствуют этой же планировке.

– В XI в. поселок вышел за пределы вала, где появились жилища и металлургические мастерские. Предположительно в XII в. площадь городища расширилась на ~3 000 м² к югу – юго-востоку. Был насыпан новый вал, который трижды подсыпался, в результате высота его достигла 3,7 м, ширина на гребне – 3 м, а у подножия – 14 м. Глубина рва с напольной стороны достигала 1,2 м, ширина – 4-5 м. На гребне вала выявлены следы частокола. За валом на расстоянии 100 м от него был вырыт еще один ров – он был засыпан в бытность русской деревни (д. Левина на карте к. XIX в.) и случайно обнаружен в 1991 г. при попытке найти посад. Культурный слой между рвами не выявлен, но в дерновом слое найдены боевые наконечники стрел, как и в насыпи вала с напольной стороны – свидетельства штурмов городища [19, 12]. В процессе возведения новой оборонительной системы склоны и стрелка

мыса были подсыпаны слоями глины и мелкой гальки толщиной до 1 м и укреплены частоколом [19, 11]. В раскопах 2024-2025 гг. зафиксированы следы искусственной подрезки склонов мыса, а в раскопе VI 2025 г. – остатки древесного тлена от упавшего частокола. Кроме того отмечено, что под деревянные стены, вероятно, сбрасывали культурный слой, убранный при расчистке площадок под строительство, за счет чего на фотографиях с воздуха контур краев мыса очень четкий, местами даже создается иллюзия наличия по краям невысокого вала (рис. 3). Есть и еще отдельные нюансы, наблюдаемые на данных фотографиях, которые требуют проверки археологическими методами.

Как писал В.А. Оборин, «усиление укреплений связано с тем, что Анюшкар был стратегическим центром, прикрывавшим пути в среднее и верхнее течение Иньвы», поскольку он «находился в устье р. Иньвы и являлся первым поселением, за которым идет целый ряд других» [17, 108]. «Возникнув как обычное поселение, он приобрел к XII-XIV вв. функции протогорода» [25, 25].

Как уже отмечалось, в процессе раскопок городища были получены богатые материалы, отражающие особенности культуры местного финно-угорского населения и его культурно-экономическое взаимодействие, прежде всего, с Волжской Булгарией. В 1991 г. на размываемой стрелке мыса были выявлены остатки мусульманского могильника, где вскрыто 9 погребений. Его наличие свидетельствует о проживании на городище болгарских ремесленников и купцов [19, 14]. В настоящее время место, где располагался могильник, полностью смыто водохранилищем. Памятник в результате получил официальное название «Городище «Анюшкар» (Кыласово) и могильник». При разведке 1990 г. в с. Кыласово был обнаружен синхронный городищу языческий могиль-

ник [18, 61], на котором в 2025 г. под руководством Е.Л. Лычагиной были проведены рекогносцировочные раскопки, давшие интересный результат.

Наиболее полно на городище Анюшкар изучен участок у вала, где были сосредоточены жилища, производственные сооружения и жертвенный комплекс. Здесь же выявлен колодец глубиной до 4 м с остатками медного котелка на дне, еще один колодец обнаружен у старого вала. Большинство мастерских связано с черной и цветной металлургией и металлообработкой. В частности, в 1955 г. в 40 м от вала изучена кузница с глинобитным полом площадью 2 x 7 м, на котором было установлено два каменных кузнечных горна, обращенных устьями друг к другу. В кузнице найдены железная наковальня и прочие предметы, связанные с кузнечным производством. В 2025 г. рядом с местом, где обнаружена кузница, был заложен раскоп (рис. 3, 5), в котором собрано значительное количество материалов, связанных с кузнечным производством.

На городище найдены гончарная мастерская, плавильный горн и открытые очаги для плавки металла, косторезная и кожевенная мастерские и др. [25, 25]. С городища Анюшкар происходит наиболее многочисленная в Пермском крае коллекция форм-изложниц для отливки латунных и бронзовых слитков, и, в частности, найдена целая форма с литейными гнездами, предназначенными для отливки слитков разного размера и веса, которые могли использоваться как средство платежа [27].

Наличие многочисленных следов ремесленного производства стало еще одним важным фактором продолжения исследований на городище Анюшкар, поскольку изучение технологии средневековых ремесел, в особенности кузнечного, литейного и ювелирного дела, является приоритетным направлением в исследованиях археологов ИГИ УрО РАН. Пока в новых раско-



Рис. 5. Процесс работ на раскопе III 2025 г.

пах исследованы остатки сооружений преимущественно бытового характера. Но среди разнообразных находок представлены отходы, полуфабрикаты, инструментарий, связанные с кузнечным и литейным производством, сырье и полуфабрикаты для ювелирного дела (рис. 6). В особенности широко представлены предметы, связанные с косторезным производством – заготовки из рога и кости (рис. 7), не завершённые изделия. И, как и в предыдущих раскопках, среди находок многочисленны разнообразные роговые и костяные изделия, которыми так славится Анюшкар.

Довольно широко среди находок представлены предметы, отражающие активную торговлю на территории городища, – монеты, гирьки-разновесы, привозные вещи из Волжской Булгарии и с территории Руси. Но все же наиболее значительную часть материалов составляют вещи, типичные для ломоватовской и родановской культур Пермского Предуралья. В особенности это касается местной лепной керамической посуды, которая на городище Анюшкар отличается высокой степенью орнаментации (до 60%, по расчетам В.А. Оборина [17, 103]) и своеобразием узоров и нуждается в отдельном изучении.

Таким образом, продолжение исследований городища Анюшкар обусловлено

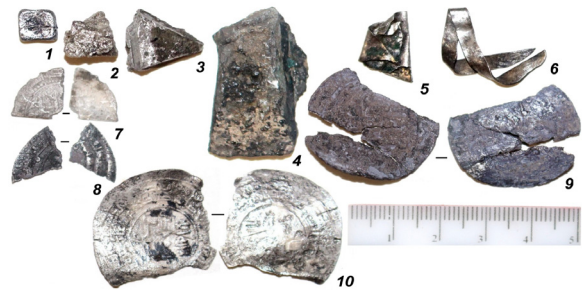


Рис. 6. Сырье для ювелирного дела: 1-4 – слитки серебра, 5-6 – серебряные пластины, 7 – фр. монеты (Бувайхиды, Адуд [ад-даула ва Тадж ал-милла Абу Шуджа], место чеканки – Астарабад(?), 369-370 гг.х. (979/980 г. (?)), 8 – фрагмент куфического дирхама, 9 – монета (Саманиды, Наср б. Ахмад, с именем халифа ал-Муктадир биллаха, по типу – 301-320 гг.х. (913-932 гг.)), 10 – монета (Волжские булгары, Мумин б. ал-Хасан, Булгар, 370-ые гг.х. (980-ые гг.))

не только необходимостью проведения аварийно-спасательных работ, но и перспективностью научного исследования. На ближайшие годы планируется изучение участков вдоль края мыса, обращенного к водохранилищу, которые неминуемо будут разрушены. Одновременно с помощью современных методов с применением междисциплинарного подхода следует провести дополнительные исследования в центральной части городища для уточнения его планиграфии и углубления знаний о специфике бытового устройства, хозяйственной и производственной деятельно-

сти жителей городища. Самой сложной задачей является сбор разрозненных и частично уже утраченных материалов предыдущих исследований, их обобщение и подготовка масштабной публикации, которой памятник, безусловно, заслуживает.



Рис. 7. Заготовки из кости и рога



Рис. 8. Примеры изделий из кости и рога:
1 – емкость, 2 – кочедык, 3-5 – наконечники стрел, 6 – манок на рябчика, 7 – фр. наборной рукояти ножа, 8 – рукоять, 9 – железный резец с костяной рукоятью, 10 – рукоять шила, 11-14 – застежки



Рис. 9. Примеры изделий из кости и рога:
1 – ложка, 2 – пуговица, 3 – ногтегистка, 4-6 – гребешки, 7-8 – наборные расчески



Рис. 10. Примеры бронзовых украшений:
1-10 – ломоватовской культуры, 11-15 – родановской культуры



Рис. 11. Примеры украшений из серебра:
1 – фр. медальона, 2-3 – серьги, 4-5 – фр. височных украшений, 6-8 – перстни

Библиографический список

1. Белавин А.М. Камский торговый путь как северное ответвление Великого Волжского пути // Великий Волжский путь. Материалы Круглого стола и Международного научного семинара. Казань, 28-29 августа 2000 года. – Казань: ИИ АНРТ, 2001. – С.140-145

2. *Белавин А.М.* Камский торговый путь. Средневековое Предуралье в его экономических и этнокультурных связях. – Пермь: ПГПУ, 2000. – 200 с.
3. *Белавин А.М., Оборин В.А.* Посредническая роль Волжской Болгарии во взаимодействии Верхнего Прикамья и Древней Руси // Волжская Булгария и Древняя Русь (к 1000-летию русско-булгарского договора). Тематический сборник КНЦ АН СССР. – Казань: ИЯЛИ им. Г. Ибрагимова, 1986. – С.63-76.
4. *Белавин А.М.* О локализации страны Вису в Пермском Приуралье // Коми-пермяки и финно-угорский мир. – Кудымкар: Коми-пермяцкое кн. из-во, 1997. – С.166-170
5. *Ястребов Е.В.* Сведения о Приуралье и Уральских горах в описаниях арабских путешественников и географов X-XIV вв. // Ученые записки ПГУ. №230. – Пермь, 1970. – С.171-188
6. *Белавин А.М.* Камский торговый путь из Болгара «в страну Вису и Чулман» // Международные связи, торговые пути и города Среднего Поволжья IX-XII вв.: материалы междунар. симп., Казань, 8-10 сент. 1998 г. – Казань: Мастер Лайн, 1999. – С.161-173
7. *Белавин А.М.* Торговые фактории болгар как фактор ранней урбанизации Пермского Предуралья в эпоху средневековья // Древние и средневековые общества Евразии: перекресток культур: международный научный симпозиум, посвященный памяти видного ученого-археолога, профессора, академика Академии наук Республики Башкортостан, доктора исторических наук Н.А.Мажитова. г. Уфа, 6–7 декабря 2018 года: сборник материалов / под общ. ред. А.И. Уразовой. – Уфа: Мир печати, 2018. – С. 118–125.
8. *Белавин А.М., Крыласова Н.Б.* Древняя Афкула – исламская столица «Седьмого климата» // Ислам в Волго-Камье и Предуралье: ранние страницы истории. материалы Всерос. научн. конф. с международным участием в рамках Третьего Международного форума мусульманской культуры «Мусульманский мир-2012» (Пермь, 16 марта 2012 г.). – Пермь: ПГГПУ, 2012. – С.30-41
9. *Белавин А.М.* О раннем этапе болгаро-пермских контактов // Ранние болгары и финно-угры в Восточной Европе. Казань: ИЯЛИ, 1990. С.125-131
10. *Белавин А.М.* Вопросы ранней урбанизации в средневековом финно-угорском мире по данным археологии // Труды Камской археолого-этнографической экспедиции. – 2019. Вып. XV. – С.117-127
11. *Белавин А.М.* Реки как транспортная основа Камского торгового пути // Труды Камской археолого-этнографической экспедиции. – 2023. Вып. XII. – С. 3-14
12. *Бадер О.Н., Оборин В.А.* На заре истории Прикамья. – Пермь: Пермск. кн. из-во, 1958 г. – 244 с.
13. *Оборин В.А.* Этнические особенности средневековых памятников Верхнего Прикамья // Вопросы археологии Урала. Вып.9. – Свердловск: УрГУ, 1970. – С.3-29
14. *Оборин В.А.* Коми-пермяки // Финно-угры Поволжья и Приуралья в средние века. – Ижевск: УдИИЯЛ УрО РАН, 1999. – С.255-298
15. *Бадер О.Н.* Камская археологическая экспедиция // КСИИМК. Вып. 51. – М.-Л., 1953. – С.88-90
16. *Бадер О.Н.* Камская археологическая экспедиция // КСИИМК. Вып. 55. – М.-Л., 1954. С.128
17. *Оборин В.А.* Камская археологическая экспедиция в 1955 г. // КСИИМК. Вып.74. – М.: АН СССР, 1959. – С.101-109
18. *Ленц Г.Т., Терехин А.А.* Раскопки Кыласова городища // Археологические открытия Урала и Поволжья. – Ижевск: УдИИЯЛ УрО АН СССР, 1991. – С.58-61
19. *Оборин В.А., Ленц Г.Т.* Городище Анюшкар (по раскопкам 1951-1955, 1989-1991 гг.) // Вестник Музея археологии и этнографии Пермского Предуралья. Вып.2. – Пермь: ПГПУ, 2008. – С.10-15
20. *Ожегова М.Н.* Коми-пермяцкие предания о Кудым-Оше и Пере-богатыре. – Пермь: ПГПИ, 1971. – 132 с.
21. *Шумилов Е.Н.* Населённые пункты Пермского края: Краткий исторический справочник. Изд. 2-е. // archive.today. – 2012.
22. *Шмидт А.В., Прокошев Н.А.* Работы на строительстве Пермской гидроэлектростанции (Сред-волгстрой) // Известия ГАИМК. Вып.109: Археологические работы Академии на новостройках в 1932-1933 гг. Ч.1. – М.-Л.: ОГИЗ, 1935. – С.166-187
23. *Талицкий М.В.* Верхнее Прикамье в X-XIV вв. // МИА, № 22. – М.: АН СССР, 1951. – С.33-96.
24. *Копытов С.В., Смертин А.Р., Хабибуллина А.Т.* Геоинформационные технологии в выявлении селитебных предпочтений древнего и средневекового населения долины р. Иньвы (Пермский край) // VI Северный археологический конгресс.8-11 октября 2024 г., Сургут. Материалы докладов. – Екатеринбург: ИИиА УрО РАН, 2024. – С.490-492

25. *Оборин В.А.* Анюшкар (Кыласово) городище // Уральская историческая энциклопедия. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – С.25
26. *Крыласова Н.Б.* Особенности средневекового домостроительства на территории Пермского края // Вестник Пермского научного центра. – 2016, №3. – С.63-77
27. *Крыласова Н.Б.* Литейная форма-изложница с городища Анюшкар (к вопросу о системе «номиналов» металлических слитков) // Археология Евразийских степей. 2023. № 5. С. 114-123.

ANYUSHKAR SETTLEMENT: TASKS AND PROSPECTS FOR NEW RESEARCH

Krylasova N.B.

Institute of Humanitarian Studies UB RAS

For citation:

Krylasova N.B. Anyushkar settlement: tasks and prospects of new research // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 95–106. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.9>

Anyushkar settlement is one of the most famous and best-excavated archaeological sites in the Perm Region and the only one whose name is known thanks to the traditions of the Permian Komi. It rises on the shore of the Kama reservoir near the village of Kylasovo, and is a very picturesque and iconic place. It is an ancient settlement that occupied an advantageous strategic position near the confluence of the river. During its heyday, the village of Inva in Kama was a Bulgarian trade and craft trading post. The presence of a Muslim burial ground testifies to the residence of the Bulgars here. A variety of craft workshops, dwellings, and defensive structures have been studied at the settlement. During the excavations, rich and expressive materials were collected, testifying to the peculiarities of the way of life, economic and industrial activities of the inhabitants of the settlement, and their cultural and economic ties. However, the results of its research have received little publication coverage, and the materials obtained have remained unpublished. Since 2024, the settlement has been the object of research by the Institute of Humanitarian Studies, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Firstly, the monument requires urgent rescue operations, as it is rapidly being destroyed by the reservoir. Secondly, it requires clarifying some of the conclusions made by previous researchers, taking into account new knowledge and techniques, using an interdisciplinary approach. The continuation of the research is also due to the fact that the technology of medieval crafts remains a priority area in the research of archaeologists of the Institute of Humanitarian Studies, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and Anyushkar can provide a lot of additional data for the development of this topic. The ultimate goal is to collect disparate data on previous studies, supplement them with new information to prepare a large-scale publication, which this landmark archaeological site for the Perm Region deserves.

Keywords: archeology, the era of the Middle Ages, Perm Region, Anyushkar settlement, history of study, Lomovatonov culture, Rodanov culture, craft, trade.

Сведения об авторе

Крыласова Наталья Борисовна, доктор исторических наук, профессор, главный научный сотрудник Института гуманитарных исследований УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИГИ УрО РАН»), 614013, Пермский край, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4; e-mail: n.krylasova@mail.ru

Материал поступил в редакцию 14.10.2025

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО



ОТ УДАРНЫХ ВОЛН ДО МЕХАНОБИОЛОГИИ ЖИВЫХ СИСТЕМ! К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ОЛЕГА БОРИСОВИЧА НАЙМАРКА

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

А.Ю. Изюмова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Пантелеев И.А., Изюмова А.Ю. От ударных волн до механобиологии живых систем! К 75-летию со дня рождения Олега Борисовича Наймарка // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 108–117. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.10>

Олег Борисович Наймарк – ученый мирового уровня, чье имя известно далеко за пределами Российской Федерации. Доктор физико-математических наук, профессор, автор более пятисот научных статей, десятка патентов на методы и устройства различного назначения. Масштаб его деятельности – от развития пермской научной школы механики деформируемого твердого тела до плодотворного сотрудничества с аэрокосмическими и оборонными предприятиями, а также ведущими мировыми научными группами – сложно переоценить.

Очерк посвящен основным этапам профессионального становления ученого, личным воспоминаниям и событиям, которые сформировали уникальный научный путь Олега Борисовича.

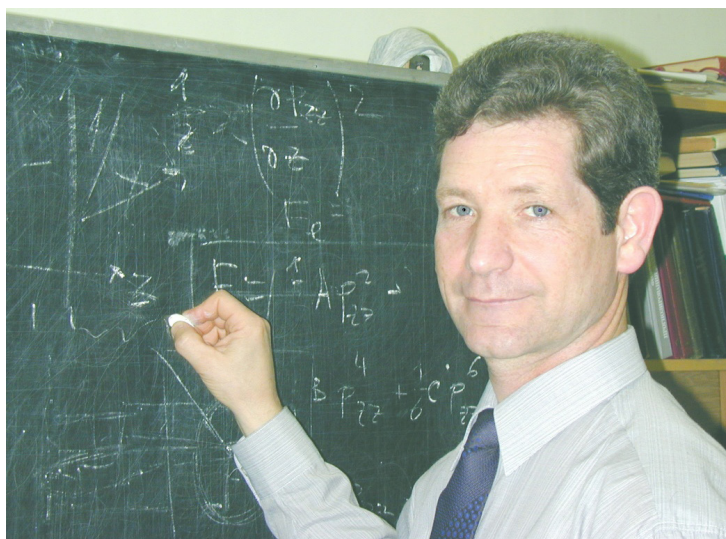


Рис. 1. Олег Борисович Наймарк. Становление лаборатории, 1994 год

1. Истоки призвания: жизненный путь к науке

Олег Борисович родился 20 февраля 1950 года на острове Сахалин, в семье офицера, где его отец, Наймарк Борис Иванович, после войны и окончания военного училища начал службу на освобожденной части Южного Сахалина. Мама, Наймарк Нина Васильевна, учитель начальной школы, несмотря на многочисленные переезды, умела создать уют и поддержать отца. Первые месяцы после рождения первенца семья жила в общей казарме, где размещался взвод отца. Потом начался период переездов (типичная судьба семьи офицера), растянувшийся больше чем на 17 лет. За десять лет школьник Олег Наймарк сменил множество городов, учился в 8-ми разных школах на Дальнем Востоке, Сибири и Урале.

В 1965 году Пермский гарнизон, где служил Борис Иванович, перебросили в г. Нерчинск, на границу с Китайской Народной Республикой, куда последовала и семья. В девятом классе в гарнизонной школе не было части предметов и преподавателей, поэтому на семейном совете было принято решение о возвращении мамы с детьми в Пермь, где Олег продолжил обучение в первом в городе физическом классе школы № 9. Пришлось наверстывать пропущенный материал по ряду предметов, но в Нерчинске помог сборник задач, собранный отцом по физике и математике из страниц раздела для поступающих в ВУЗы в журнале «Наука и жизнь» в относительно свободное ночное время, когда он был дежурным по части. Решение этих задач помогло школьнику Олегу Наймарку ликвидировать пробелы в знаниях и стать в Перми призером городской олимпиады по физике и математике.

Вопрос, куда поступать после окончания школы, решил после случайной встречи двух институтских подруг, мамы и Юлии Александровны Поздеевой,

вскоре после приезда Александра Александровича Поздеева в Пермь, где им была создана кафедра «Динамики и прочности машин» в Пермском политехе.

– Во время одной из встреч Александр Александрович сказал: «Нужно поступать на ДПМ!» и дал для изучения книгу Ван Цзи-де по теории упругости, которая является сложной даже в рамках университетского курса. Но Александр Александрович, будучи инженером, самостоятельно изучал университетские курсы, поэтому для него это было естественно.

Сдав на отлично один экзамен как медалист, поступил на специальность ДПМ. Так начался студенческий период в жизни Олега Борисовича. Ядро группы, со слов Олега Борисовича, составляли ребята из области, жившие в общежитии, что и явилось основой крепкой дружбы, которая сохранилась на долгие годы. Вспоминая студенческие годы, Олег Борисович отмечает большое влияние и роль коллектива кафедры «Динамика и прочность машин», той атмосферы доверия и требовательности, которая сопровождала все годы обучения. Научный и жизненный темп подчинялся также спортивному увлечению альпинизмом, когда после первого курса Александр Александрович и Эдуард Робертович Римм посоветовали поехать в альпинистский лагерь в легендарное Баксанское ущелье. Атмосфера ущелья (где за год до этого снимался фильм «Вертикаль»), окружение (первым инструктором был легендарный альпинист, мастер спорта, профессор, генерал Михаил Яковлевич Алферьев, создатель судов на подводных крыльях) «задержала» Олега Борисовича в альпинизме на 20 лет, он являлся первым председателем секции альпинизма Пермского политеха, участвовал в восхождениях на Кавказе, Тянь-Шане в составе сборной команды города. Подготовка к сезону часто проходила вместе с Александром Александровичем Поздеевым, когда он

готовился к высотным восхождениям (марафоны, тренировки на скалах).

– В районе «Ермака» у нас была «своя скала», на которой мы отрабатывали работу в связке. По вечерам, к удовольствию Александра Александровича, мы присоединялись к «альпинистскому табору» у костра с традиционными «приколами» без учета «табелей и рангов...». Александр Александрович считал, что именно занятия альпинизмом сочетаются с научными исследованиями, для которых, в первую очередь, при всем прочем... необходима выносливость. Кроме этого, во время восхождений можно «восстановить» мыслительные способности, а возвращение «на равнину» и обилие кислорода сопровождается ощущением «здоровой эйфории», когда кажется, что нет «нерешаемых задач».

После окончания института Олег Борисович поступил в аспирантуру к Александру Александровичу Поздееву, руководителю созданного Отдела физики полимеров УНЦ АН СССР – первой академической организации в Перми. Александр Александрович всегда давал возможность выбора направления исследования. Олег Борисович вспоминает:

– Когда я принес написанную кандидатскую диссертацию, то реакция была «прямая»: «Работа, по-моему, хорошая, но я не знаю, где ее защищать. Поезжайка к моему приятелю Володе Скрипову (позже академику Владимиру Павловичу Скрипову), послушаем, что он скажет».

Это закончилось тем, что инженеру-механику Олегу Наймарку пришлось изучать дополнительные курсы, сдавать новые кандидатские экзамены и защищать диссертацию по «Теплофизике и молекулярной физике», что оказалось очень полезным в будущем. В дальнейшем отношения с Владимиром Павловичем, исключительно одаренным человеком, классиком в теории критических явлений,

автором ряда поэтических сборников, перешли в дружбу между семьями. Научные традиции продолжают непрерывающимися связями лаборатории с Институтом теплофизики УрО РАН, в том числе в рамках регулярного совместного семинара, основанного Владимиром Павловичем.

После защиты кандидатской диссертации, посоветовавшись с Александром Александровичем, Олег Наймарк перешел в созданный теоретический сектор, которым руководил блестящий физик Марк Исаакович Шлиомис. Олег Борисович вспоминает:

– Так получилось, что я был единственным механиком среди физиков, и на протяжении длительного времени на регулярных семинарах мои сообщения были объектом «здорового остракизма», так как феноменология механики всегда вступала в конфликт с принципами теоретической физики. Со временем, вспоминая замечательные годы в теорсекторе, можно констатировать, что это было время обогащения сотрудников различными исследовательскими культурами. Этому способствовал сильный научный состав и атмосфера теорсектора, которую создавали Марк Исаакович Шлиомис, Юрий Львович Райхер, Александр Абович Непомнящий, Татьяна Петровна Любимова, Иван Григорьевич Шапошников, Григорий Зиновьевич Гершуни, Ефим Михайлович Жуховицкий, Виктор Иванович Степанов, Виктор Владимирович Русаков, Александр Федорович Пшеничников.

Через 11 лет после защиты кандидатской диссертации была написана докторская диссертация, и перед Олегом Борисовичем вновь встал вопрос, где ее защищать.

– Сначала я пошел по традиционному для механика пути. В те времена защита докторской по конкретной специальности была событием всесоюзного мас-

штаба. Было негласное правило, что нужно выступить на семинарах всех членов экспертного совета Высшей аттестационной комиссии, а это Н.Ф. Морозов, А.А. Ильюшин и др. В общем, я прошел по всему этому кругу, оценка была положительной, но сдержанной, т.к. работа была на «стыке» механики и физики, а точнее механики и физики мезоскопических систем. Это междисциплинарное направление в то время только зарождалось. Но, поскольку я в прикладной области в то время много работал с отделом Владимира Евгеньевича Фортова, то его мнение оказалось решающим, и защита по «Физике твердого тела» прошла в созданном Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в Томске. Трансдисциплинарность исследований и их результаты были активно поддержаны директором института Виктором Евгеньевичем Паниным, основателем направления физической мезомеханики проф. Владимиром Александровичем Лихачевым и директором Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, член-корреспондентом РАН Сергеем Павловичем Курдюмовым, которые оппонировали диссертацию. Моя защита в новом совете была второй, а первой была защита Геннадия Исааковича Канеля.

По мотивам диссертации очень плодотворным было сотрудничество с Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и его директором Сергеем Павловичем Курдюмовым, удивительным человеком и исследователем, создавшим вместе с академиком Александром Андреевичем Самарским отечественную школу синергетики на фундаментальном математическом базисе. Они являлись авторами теоретического открытия так называемых «режимов с обострением», которые сопровождают явления в токамаках, физике взрыва, процессах разрушения, турбулентности и,

как оказалось, при эволюции биологических систем. В этом смысле знаковой для меня и лаборатории является публикация результатов в «Докладах АН СССР», представленная акад. А.А. Самарским, посвященная теории и ударно-волновому эксперименту по наблюдению режимов с обострением.

Сергей Павлович Курдюмов, Владимир Александрович Лихачев, Виктор Евгеньевич Панин, Владимир Павлович Скрипов бывали впоследствии у нас в лаборатории, мы были по-человечески близки. В настоящее время их портреты можно увидеть в лаборатории, потому что они были и остаются знаковыми людьми в научном пути лаборатории.

Одним из разделов докторской диссертации были исследования в области сверхпластичности, в том числе ее инициирования импульсными токами высокой плотности, которые проводились совместно с коллегами из Уфимского авиационного института, Оскаром Акрамовичем Кайбышевым и Русланом Зуфаровичем Валиевым в рамках государственных программ. После наших докладов у вице-президента РАН Константина Васильевича Фролова Президиумом АН СССР было принято решение о создании в Уфе Института проблем сверхпластичности АН СССР, с выделением части ставок в ИМСС УрО РАН для создания лаборатории «Физических основ прочности», заведующим которой по сей день является Олег Борисович Наймарк.

После создания лаборатории началась активная деятельность по отбору талантливой молодежи из числа студентов, которым Олег Борисович читал лекции в университетах города Перми, формирования уникальной экспериментальной базы, позволяющей изучать многомасштабное поведение конструкционных и природных материалов в широком диапазоне интенсивностей воздействия.

Развивалось международное сотрудничество с зарубежными научными коллективами.

2. Трудовые будни и международное сотрудничество

Олега Борисовича неоднократно приглашали на работу в качестве приглашенного профессора известные университеты и исследовательские центры Европы и США. Многолетнее сотрудничество сложилось с известной Лабораторией прочности и надежности Университета Бордо и Национального исследовательского центра (Франция), которую возглавлял известный специалист, президент европейской динамической ассоциации проф. Жан-Люк Латайяд (Jean-Luc Lataillade). На протяжении более двадцати лет Олег Борисович Наймарк был приглашенным профессором в данной лаборатории. Зарубежная деятельность Олега Борисовича Наймарка была очень полезна для Лаборатории физических основ прочности в том смысле, что он регулярно изыскивал возможность для стажировки молодых сотрудников во Франции. Во время таких стажировок молодых сотрудники генерировали и обсуждали новые совместные идеи, что, безусловно, способствовало восприятию науки как неотъемлемой части человеческой жизни, не знающей границ.

– Жан-Люк и сотрудники его лаборатории неоднократно бывали в Перми, в Институте механики сплошных сред УрО РАН. За последние тридцать лет мы провели около десяти совместных международных конференций и семинаров с участием наших французских коллег. Большинство этих научных мероприятий организовано и проведено силами сотрудников нашей лаборатории.

В начале 2000-х годов исследования с коллегами из Бордо были сконцентрированы на разработке фундаментальных основ оценки надежности материалов авиа-

ционного моторостроения в широком диапазоне интенсивностей нагружения с использованием экспериментальных возможностей обеих лабораторий. Был исследован ряд новых и важных для приложений экспериментальных проблем с использованием впервые созданных экспериментальных установок, в частности, в области так называемой гигацикловой усталости. Исследование закономерностей этого явления, проведенное совместно с классиками в области усталости, проф. П. Парисом и Ж.-К. Батиа́сом, позволило развить фундаментальные основы для прогнозирования ресурса конструкций авиационного моторостроения.

Памятным событием явилась также специальная месячная программа в области физики и механики, проведенная Институтом Исаака Ньютона в Кембридже в 2000 году и посвященная номинации одного из ученых (обсуждались Исаак Ньютон и Альберт Эйнштейн) как «Ученого тысячелетия» с привлечением примерно 30 специалистов и их обзорами по оригинальным результатам. Такие программы, достаточно распространенные в Европе и США, являются исключительно продуктивными для прорывных достижений в разных областях. Результаты голосования, проведенного в научном сообществе, отдали первенство Альберту Эйнштейну, который, конечно, опирался на «Начала...» Ньютона.

Значимыми моментами в становлении и развитии лаборатории были исследования в рамках программ Президиума РАН по экстремальным состояниям вещества, которыми руководил академик Владимир Евгеньевич Фортов. Олег Борисович вспоминает:

– Владимир Евгеньевич был выдающийся физик, Президент РАН, ученик Якова Борисовича Зельдовича, исследователь широчайшей физической эрудиции, руководитель научных коллективов

в Институте проблем химической физики РАН и Объединенном институте высоких температур РАН. С коллегами из этих команд нас связывают многие десятилетия научного сотрудничества и дружбы, которые каждый год «скреплялись» участием в удивительной по научному «накалу» Фортовской международной конференции по экстремальным состояниям вещества «на Эльбрусе». Работа по программам Владимира Евгеньевича по-

требовала существенного расширения кругозора всего коллектива, так как изучение поведения конденсированных сред при экстремальных воздействиях предполагало создание новой уникальной экспериментальной базы и методологии структурных исследований, которая в дальнейшем была востребована Российскими Федеральными Ядерными Центрами, организациями Роскосмоса, Объединенной двигателестроительной корпорацией.



Рис. 2. Олег Борисович на организованной лабораторией «Физических основ прочности» международной конференции «Разрушение структурно-неоднородных материалов при интенсивных воздействиях: эксперимент и многомасштабное моделирование» (февраль, 2014 год, Пермь)

Одним из новых перспективных направлений лаборатории является исследование универсальных закономерностей конденсированных сред (твердых тел и жидкостей) при интенсивных воздействиях. Развив теоретические представления Якова Ильича Френкеля, одного из основателей теоретической физики в СССР, в лаборатории возродили экспериментальные исследования, позволившие обосновать возможность единого подхода при описании механизмов пластичности и турбулентности. Эти результаты получили поддержку лауреата Нобелевской премии профессора Ильи Пригожина после доклада Олега Борисовича в Международном Сольвеевском институте физики и химии.

Исследование закономерностей поведения конденсированных сред при интенсивных воздействиях, как это ни странно звучит, оказалось решающим для формирования в лаборатории нового научного направления – механобиологии живых систем. В этом смысле знаковым является высказывание Э. Шредингера, что ДНК – это «биологический кристалл», поведение которого определяется сочетанием нелинейных свойств, характерных как для твердых тел, так и жидкостей, в том числе особенной ролью дефектов, так называемых открытых комплексов, образующихся при разрыве водородных связей между цепями в ДНК. Впервые установленная в работах Олега Борисовича нелинейная динамика

открытых комплексов позволила предложить объяснение различных сценариев экспрессии генов, характерных для клеток в нормальном состоянии, при онкологических трансформациях, в условиях микрогравитации. Важную роль в развитии данного направления сыграли исследования, проведенные Олегом Борисовичем за время работы в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, где, как известно, впервые была открыта структура ДНК. Теоретические результаты, объяснившие различные сценарии нелинейной динамики ДНК, получили развитие при проведении экспериментов по исследованию динамики температурного поля в тканях и при разработке методов анализа динамики клеток с использованием метода лазерной микроскопии. Результаты исследования, выполненного в рамках крупного проекта Федеральной целевой программы, позволили получить количественные данные, подтверждающие теоретические выводы о «пластичности» здоровых клеток и «хрупкости» раковых в терминах коллективной динамики ансамблей открытых комплексов, разработать новую конструкцию лазерного микроскопа для неинвазивного исследования динамики и морфологии клеток. Полученные результаты вызвали значительный интерес госкорпорации Роскосмос в качестве основы для разработки экспресс-методов с целью оценки влияния микрогравитации на динамику экспрессии с возможностью использования на борту МКС для обеспечения длительных космических миссий.

Содержательная часть проекта была доложена Олегом Борисовичем в Институте медико-биологических проблем РАН и в Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»). Этот цикл исследований был поддержан руководителем РКК «Энергия» академиком РАН Владимиром

Алексеевичем Соловьевым, генеральным конструктором по пилотируемым космическим системам и комплексам.

По предложению ГК Роскосмос представлена Целевая работа, результатом которой должно быть размещение орбитальной версии лазерного микроскопа на борту МКС в 2027 году с последующим исследованием влияния микрогравитации с использованием методологии, развитой в лаборатории.

Олег Борисович отмечает, что исследования в трансдисциплинарных (именно транс-, а не междисциплинарных) областях предполагают формирование научных сообществ из специалистов разных областей, которые начинают формировать «язык» для понимания друг друга. По образному выражению Ламарка, именно с формирования «языка» начинается качественный прогресс в познании.

В связи с этим вспоминается разговор после доклада в Santa-Fe Institute for Theoretical Physics с Мюрреем Гелл-Манном, получившим Нобелевскую премию за открытие кварков. Реагируя на результаты по динамике ДНК, проф Гелл-Манн посетовал, что занятия физикой ему «навязали родители», а он всю жизнь мечтал заниматься лингвистикой. И, наконец-то, его мечта сбылась, он с двумя российскими лингвистами (советская школа лингвистов, по его утверждению, была сильнейшей в мире) выиграл грант по корневым признакам языков разных народов. На следующий день был его доклад с многочисленными примерами общности корневых слов и понятий... Фактически «новый язык» создается в области биологии, медицины под влиянием физики, о чем написал физик Карл Вёзе (Carl Woese), создатель Института геномной биологии, в своей статье “Biology next revolution” в “Nature”. Проводя аналогию между биологической эволюцией и критическими явлениями в физике, он сформулировал концепцию «Horizontal gene

transformation», в которой эволюционные процессы в биологии связываются с конечным числом коллективных мод «нелинейной биологической системы», природу которых предстоит еще выяснить... Другим примером являлся семинар, организованный на базе Ватикана заместителем Папы по трансдисциплинарным исследованиям (с базовым образованием «астрофизика») с привлечением специалистов в области физики, биологии, медицины с названием «Действительно ли биология проходит через узкое горлышко бутылки? Приложения в области онкологии». Отвечая за физическую секцию на данном семинаре, Олег Борисович отмечает, что наиболее сильное впечатление от семинара было связано

с пониманием, что специалисты из разных областей начинают говорить на одном «языке», понимая друг друга. Именно эта цель была поставлена в наших исследованиях в области механобиологии с участием академика И.Б. Ившиной, профессор-онкологов О.А. Орлова, Г.Г. Фрейнд; зав. лабораторией ИТХ УрО РАН В.В. Гришко, специалиста в области биохимии.

– Для меня очень важно, чтобы все направления лаборатории жили, чтобы у них были лидеры. Мне бы хотелось иметь более спокойные условия для того, чтобы завершить вместе с сотрудниками знаковые работы. Но, увы, текущее положение в академии такое, что «расслабиться» не дает.



Рис. 3. Олег Борисович принимает в лаборатории официальную делегацию во главе с руководителем ФАНО Михаилом Михайловичем Котюковым и губернатором Пермского края Максимом Геннадьевичем Решетниковым (2017 год, Пермь)

3. День настоящий и молодежь

В настоящее время состав лаборатории физических основ прочности – это девятнадцать человек, большинство из них пришли в лабораторию еще студентами. Многие из сотрудников лаборатории Олега Борисовича прошли стажировки в ведущих зарубежных лабораториях и университетах. В лаборатории сложился дружный научный коллектив, работающий по широкому спектру направлений, и этот спектр

продолжает расширяться. Значимым является то, что большинство из этих направлений относится к трансдисциплинарным.

– Логика научного исследования, познания определяется как мировыми тенденциями, так и полученными результатами. В этом смысле логика научных исследований – это не та область, которую можно администрировать. Ей можно помогать, но направление движения определяется компетенциями научного сообщества.

За прошедшие тридцать лет в лаборатории накоплен богатый опыт и создана уникальная экспериментальная база.

– *Важно отметить, что более пятидесяти процентов экспериментальных установок, которые есть в лаборатории, созданы от начала до конца сотрудниками лаборатории. Я считаю, что это очень важный момент. Созданию экспериментальных установок всегда предшествует понимание природы исследуемого явления и его описания. Сначала создается модель явления, пишутся уравнения, анализ их показывает, в каком направлении двигаться, а уже потом решаешься вкладывать деньги в разработку или покупку дорогостоящего оборудования.*

Созданная в лаборатории экспериментальная база позволяет решать прикладные задачи в интересах самых различных промышленных партнеров.

Олег Борисович по сей день занимается обучением и воспитанием подрастающей молодежи, преподает в Пермском национальном исследовательском политехническом университете и Пермском государственном национальном исследовательском университете.

– *Когда студенты приходят в лабораторию на практику или выполнять дипломную работу, главное – их заинтересовать, чтобы они поняли, что занимаются интересными важными задачами. Нет других способов удержать способных ребят.*

Большинство сотрудников лаборатории прошли стажировки в зарубежных научных коллективах, с которыми лаборатория сотрудничает. Именно после таких поездок у молодых ученых возникает правильное ощущение и понимание проведения работ соответствующего научного уровня.

В целом вопрос мотивации молодежи оставаться работать в академическом институте – сложный вопрос. Так всегда было в науке, и это не секрет, что ученый – это не самая обеспеченная категория. При всем при том, что занятие наукой – это исключительно тяжелый род деятельности. Безусловно, материальные моменты очень важны, и мне как заведующему лабораторией приходится их постоянно решать. Но ключевым моментом является актуальность решаемых задач и их фундаментальная значимость.

При таком уровне загруженности, плотном рабочем графике, непрерывных командировках возникает закономерный вопрос: откуда Олег Борисович черпает силы, настроение, вдохновение, за счет чего «заряжается»?

– *В известной степени это некие семейные традиции. При том кочевом образе жизни, который вела наша семья, у моих родителей до сорока лет не было мебели, были в основном чемоданы. Поэтому, когда мы приезжали на новое место, то был такой настрой, что это все преодолимо.*



Рис. 4. Олег Борисович на горных лыжах (2010 год, Эльбрус)

4. Заключение

В конце прошлого года крупнейший научно-издательский дом Elsevier опубликовал рейтинг самых цитируемых ученых мира в разных областях науки. В топ 2% вошел и Олег Борисович Наймарк. Олег Борисович – кавалер французского ордена Академических пальм, почетный работник науки и высоких технологий РФ, лауреат Премии имени академика Н.А. Семихатова, лауреат премии Пермского края I степени по направлению «физико-математические науки». Его вклад в развитие мировой науки, развитие науки в нашей стране и Пермском крае сложно переоценить. Олег Борисович воспитал плеяду талантливых ученых и продолжает передавать знания и культуру мышления через лекции, семинары, разговоры и личный пример молодому поколению. За более чем тридцать лет под руководством Олега Борисовича защищено пятнадцать кандидатских и две докторские диссертации. Ученики Олега Борисовича, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Олег Анатольевич Плехов и д.ф.-м.н. Иван Алексеевич Пантелеев, возглавили новые лаборатории, активно воспитывают подрастающее поколение исследователей и сохраняют традиции,

привитые с «аспирантской скамьи» Олегом Борисовичем.

Ударные волны, механика разрушения, физика прочности и пластичности, физика и механика горных массивов и геосред, космология, механика биологических систем – это отнюдь не полный список направлений, в которых работает Олег Борисович. Юбилей – это не только время вспомнить прошлое, но и возможность задуматься о будущем. А впереди активная научная жизнь: проекты, статьи, командировки, конференции, семинары, лекции, дискуссии.

От всей души – с безмерной благодарностью, глубочайшим уважением и искренним восхищением – поздравляем Олега Борисовича с юбилеем! Пусть аналитический ум и физическая интуиция продолжают рождать смелые гипотезы, а математическая строгость – доводить их до блестящих доказательств. Пусть каждый новый результат приносит радость познания, а энергия для поиска неожиданных решений никогда не иссякает. Крепкого здоровья, вдохновения для решения «нерешаемых» задач и учеников, достойных продолжать дело созданной научной школы.

Сведения об авторах

Пантелеев Иван Алексеевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов, 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: pia@icmm.ru

Исюмова Анастасия Юрьевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых деформируемых тел, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: fedorova@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 06.10.2025

СТРОИМ ЖИЗНЬ В НАУКЕ ПО ПРАВИЛАМ АКАДЕМИКА ИРИНЫ БОРИСОВНЫ ИВШИНОЙ*

М. С. Куюкина^{1,2}, Л. А. Алфимова¹, Е. А. Суханова¹, П. Ю. Мальцева^{1,2}, Н. А. Плотницкая^{1,2}, А. В. Криворучко^{1,2}, А. А. Елькин^{1,2}, А. А. Голышева^{1,2}, Г. А. Бажутин¹, М. А. Польшгалов², С. М. Тян^{1,2}, Л. В. Литвиненко¹, М. С. Филиппова¹, Т. Н. Каменских¹, М. И. Рычкова¹, М. В. Макарова^{1,2}, Л. П. Комарова^{1,2}

¹Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Building a Life in Science According to the Rules of Academician Irina Ivshina

M. S. Kuyukina^{1, 2}, L. A. Alfimova¹, E. A. Sukhanova¹, P. Yu. Maltseva^{1,2}, N. A. Plotnitskaya^{1,2}, A. V. Krivoruchko^{1,2}, A. A. Elkin^{1,2}, A. A. Golysheva^{1,2}, G. A. Bazhutin¹, M. A. Polygalov², S. M. Tyan^{1,2}, L. V. Litvinenko¹, M. S. Philippova¹, T. N. Kamenskikh¹, M. I. Richkova¹, M. V. Makarova^{1,2}, L. P. Komarova^{1,2}

¹Perm Federal Research Centre, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia



В журнале «Университет» № 15 за 2021 г. были опубликованы Правила жизни нашего Учителя – Ирины Борисовны Ившиной, академика РАН, доктора биологических наук, заведующего лабораторией алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, профессора кафедры микробиологии и иммунологии.

Сегодня, в дни ее 75-летнего Юбилея мы, благодарные ученики и коллеги, пытаемся осмыслить эти правила как руководство к действию, как маяки, помогающие находить верный путь в науке и жизни, преодолевать трудности, добиться успеха.

* Первоначально данная статья под этим же названием была опубликована в журнале «Вестник Пермского университета. Серия Биология», в №2 за 2025 г., на стр. 224–229, EDN RWFDAT

Правило № 1. «Исключительная ценность бытия – заниматься желанным делом, обращая на него все силы, интерес и энергию...».

Человеку свойственно задаваться вопросом о сущности и ценности бытия – для чего он живет, зачем пришел в этот мир. Вряд ли существует однозначный ответ на этот вопрос. Чем больше человек познает, тем больше вопросов у него возникает. Видимо, отчасти можно сказать, что сущность бытия заключается в познании окружающего мира, в самопознании. Сущность в том, чтобы оставить после себя след.

Ирина Борисовна сформулировала для себя правило исключительной ценности бытия и неукоснительно следует ему, сделав микробиологию делом всей своей жизни. Она преданно и азартно занимается любимым делом на протяжении многих десятилетий, вкладывая в свою работу, вернее сказать, призвание, всю недюжинную энергию своей души, все силы и неизбывный интерес к познанию чего-то нового. Ее любимая фраза: «Так хочется поработать всласть!»

Уникальный, самобытный и талантливый человек, который способен увлечь любимыми «родококками» своих коллег и учеников, коих у нее великое множество. Она щедро делится своими знаниями и опытом с коллективом единомышленников, оставаясь при этом бесконечно благодарной своим учителям и наставникам.

Особое значение для нее имеет общение с близкими по духу, «вдохновенными и вдохновляющими людьми». Она ценит в людях преданность профессии, благодарность за оказанную помощь и готовность прийти на помощь нуждающимся в ней.

«Немало тех, и я не исключение, кто благодарен судьбе за то, что в их жизни

случилась встреча с Ириной Борисовной. Для меня это знакомство стало поворотным моментом в моей профессиональной деятельности и осуществлением давней мечты – стать переводчиком. Я в полной мере ощутила на себе действенность ее Правила: заниматься желанным делом, ощущая поддержку руководителя и созданного ею коллектива, объединенного неподдельным интересом к профессии, готовым поделиться знаниями и прийти на помощь в нужный момент», – говорит Людмила Андреевна Алфимова.

«Какое это счастье, что в моей жизни приняла участие Ирина Борисовна», – говорит Елена Анатольевна Суханова. – «Я благодарна за все добро, которое получила за годы нашего знакомства. И стараюсь быть щедрой и независимой в повседневной жизни».

С глубоким уважением и благодарностью, Людмила Алфимова и Елена Суханова.

Правило № 2. «Величайшая честь иметь талантливых учеников..., а среди коллег – верных единомышленников-соавторов в профессии».

Много лет назад впервые, с понятной робостью студентки, переступив порог только что образовавшейся лаборатории алканотрофных микроорганизмов в стенах академического института, я сразу же была очарована атмосферой интенсивного научного поиска и творческого коллективного труда, направляемых молодой заведующей лабораторией – яркой женщиной и харизматичным лидером. Строя коллектив лаборатории как семью, Ирина Борисовна воспитывала и растила нас, своих учеников, как родных детей, не жалея сил, вкладывая душу, отдавая всю себя. Ее помощь на всех этапах – от эксперимента до поиска литературы, идейное вдохновение, всемерное поощрение

инициативы в сочетании с высокой требовательностью формировали в нас ответственность и верность родной лаборатории, общему делу. Как и многие коллеги, я безмерно счастлива тем, что непрерывно ощущаю тепло и поддержку Ирины Борисовны, моего Учителя по жизни, любимого шефа.

Будучи среди первых учеников и впоследствии коллег-единомышленников Ирины Борисовны, не перестаю восхищаться ее удивительной способности поднимать на беспредельную высоту планку своим студентам и одновременно оказывать им такое сердечное и деятельное участие, окрылять и вдохновлять на взятие новой высоты. Уже в качестве преподавателя, невзирая на часто упоминаемый ею тезис о том, что «невозможно научить, а можно только научиться», в работе со своими студентами стараюсь следовать ее Правилу: никогда не опускать руки в попытке научить, улучшить, помочь добиться успеха.

С глубокой благодарностью и восхищением, д.б.н. Мария Куюкина.

Правило № 3. *«Строгая дисциплина в работе и уважение к делу. Сомнение и недовольство собой. Самоконтроль и самокритика. “Ты сам свой высший суд” (Пушкин)».*

Настоящее исследование требует не только вдохновения, но и строгой организованности. Поэтому дисциплина – не формальность, а внутренняя ответственность каждого за качество общей работы. Микробиология требует не только знаний, но и бережного, внимательного отношения к деталям.

Ученый, который всем доволен, перестает развиваться. Здоровое недовольство собой – не слабость, а признак высоких стандартов и источник роста. Мы не боимся задавать себе сложные вопросы, пе-

ресматривать подходы и признавать ошибки. Самоконтроль и самокритика – часть нашей ежедневной практики, мы стремимся быть честными прежде всего с собой.

Ирина Борисовна своим примером показывает: научная строгость и требовательность к себе – не просто сухое правило, это философия исследователя. Только так рождаются открытия, которые выдерживают испытание временем.

С уважением и признательностью, аспирант Полина Мальцева.

Правило № 4. *«В жизни важно испытать успех. Опыт показывает: если отдавать себя целиком делу, самозабвенно и одержимо работать, тогда ждет непреходящий успех, и каждая даже небольшая удача будет огромным вознаграждением».*

Настоящее понимание этих слов моего Учителя начало приходить лишь с опытом, с первыми серьезными трудностями и первыми, пусть скромными, достижениями. Успех в науке не всегда измеряется внешним признанием или количеством публикаций. Часто он скрыт в тихом удовлетворении от выполненной задачи. Научная работа – это не только вдохновение и интерес, но и рутина, ожидание, а иногда и разочарования. Бывает, неделями не получается «сдвинуться с места». В такие моменты даже маленький результат, почти незаметный для других, приносит настоящую радость, если ты знаешь, сколько усилий и честности в него вложено. Чувство, что ты сделал что-то хорошо, действительно придает смысл. Наверное, именно оно и помогает двигаться вперед, не теряя мотивации и в конечном итоге добиваться настоящего успеха.

Сегодня я понимаю, насколько важна эта внутренняя установка: стремление

делать свое дело честно, глубоко и до конца. Именно она формирует не только профессиональный путь, но и отношение к жизни в целом. Успех в науке – это не случайность, а результат долгой, иногда незаметной работы. И если в конце дня остается чувство, что ты сделал все, что мог, – это и есть подлинное удовлетворение, ради которого стоит идти дальше.

С уважением и благодарностью, к.б.н. Наталья Плотницкая (Лучникова).

Правило № 5. *«В современной науке (тем более в биологической) ничего нельзя сделать в одиночку..., создать действительно нечто ценное возможно только в условиях активации “чувства кворума” (quorum sensing, коммуникации внутри популяции)».*

Наука не имеет границ. Научное знание не может принадлежать одному человеку или одной стране, это знание всего человечества, цивилизации. Отдельные факты, установленные научными коллективами, нанизываются друг на друга, как бусины на нитку, и складываются в гипотезы, теории, парадигмы, научные консенсусы. Они существуют подобно отдельным организмам, образующим в совокупности популяцию, сообщества, экосистемы, биосферу в конечном итоге. Механизмы, обеспечивающие обмен научными знаниями, включают в себя публикации в рецензируемых научных журналах на языке, принятом в современном глобальном научном сообществе (и да – это английский), участие в научных мероприятиях, стажировки, совместные проекты, участие в международных и локальных научных инициативах, популяризацию научных знаний, актуализацию курсов, преподаваемых в вузах. Все это в полной мере и даже больше реализуется и поощряется в лаборатории Ирины Борисовны. Она воспитывает нас как уче-

ных международного уровня, придерживающихся самых высоких стандартов в получении знаний, их интерпретации, презентации научному сообществу. Более того, Ирина Борисовна учит нас еще и личной ответственности за существование открытой науки. Ириной Борисовной проделана огромная работа по включению созданной ею уникальной в мире Региональной профилированной Коллекции алканотрофных микроорганизмов в российские и международные коллекционные инициативы (WFCC, WDCM, MIRRI, и др.). Это не только повышает статус Коллекции, но и требует следования высоким стандартам качества, прозрачности методик и открытости для мирового научного сообщества. Это обязывает поддерживать исследовательскую работу на уровне современных требований и постоянно совершенствовать методологию. Я бесконечно благодарна судьбе, что, оставаясь у себя дома, в своем родном городе, я имею возможность работать с Ириной Борисовной Ившиной – ученым мирового уровня.

С уважением и благодарностью, д.б.н. Анастасия Криворучко.

Правило № 6. *«Современная научно-исследовательская деятельность и работа преподавателя вуза немислима без научных публикаций результатов труда в профессиональных изданиях в России и за рубежом, без представления материалов на международных и всероссийских конференциях, сопряжена с защитой прав интеллектуальной собственности в виде патентов на полезные модели и новые разработки».*

Опыт работы в науке, а затем руководства факультетом позволяет в полной мере оценить глубину сформулированного Ириной Борисовной правила. В современных реалиях академического мира пу-

бликационная активность стала не просто важным, а жизненно необходимым компонентом научной и преподавательской карьеры. Работая деканом, особенно остро ощущаешь, что наука – это не только поиск истины, но и непрерывная коммуникация. В настоящее время работа преподавателя высшей школы немыслима без постоянной актуализации научных знаний в своей области, т. к. информация обновляется и устаревает с гипервысокой скоростью. Публикации в высокорейтинговых журналах, выступления на конференциях, патентование разработок – ключевые индикаторы эффективности ученого, которые помогают Ирине Борисовне постоянно находиться на «острие» науки, заражая «вирусом» любознательности новые поколения студентов, существенно влияя на рейтинг вуза, возможности получения финансирования, привлекать талантливых абитуриентов в университет. Драгоценный опыт, полученный в лаборатории Ирины Борисовны, научил меня, что качественная публикация – это не просто формальность, а возможность донести свои открытия до мирового научного сообщества, получить признание коллег, защитить приоритет идей. Сегодня, руководя факультетом, я стремлюсь поддерживать и развивать ту культуру научного труда, которой учит нас Ирина Борисовна – культуру, основанную на принципах доказательности, открытости, уважении к своему и чужому труду.

С любовью и благодарностью, к.б.н. Андрей Елькин.

Правило № 7. «Сегодня наука становится междисциплинарной, синтез приоритетен во всем. Чтобы вписываться в современный научный процесс, требуется особая культура кооперативного взаимодействия специалистов разных научных дисциплин, успешному партнерству необходимо учиться. Принадлежность

к междисциплинарному научному сообществу придает ощущение нужного единства, консолидации и является абсолютным условием противостояния любым опасностям современного мира. Говоря языком биологии, выживает консорциум, формирующийся как защитный механизм (иммунитет), а не множество единичных нередко конкурирующих индивидов».

В лабораторной практике междисциплинарность проявляется через совместные проекты биологов, химиков, физиков, математиков, где каждый специалист вносит уникальный вклад. Особую роль в этом процессе играет научный руководитель-координатор, который обеспечивает эффективное взаимодействие и синхронизацию усилий команды. Такой синтез знаний становится источником инноваций, ускоряет научный прогресс и значительно повышает качество исследований.

Жизненный урок этого правила для нас, молодых исследователей, – научиться кооперации, партнерству, выработать культуру взаимного уважения и доверия. Я искренне благодарна нашему научному руководителю, Ирине Борисовне, за ее знания, опыт и труд, благодаря которым междисциплинарные исследования постоянно совершенствуются. Ее связи с исследователями из разных областей помогают нам налаживать эффективное сотрудничество и обмен знаниями. Под ее руководством мы учимся работать в команде и достигать общих целей, что особенно важно в современном научном процессе.

С уважением и благодарностью, аспирант Анастасия Голышева.

Правило № 8. «Надо бояться глупости. К сожалению, она часто встречается и нередко сильнее ума. Если умный человек зачастую бывает одинок, то глупость всегда найдет “однокашников”».

Это правило для нас звучит как глубокое жизненное наставление, как вечная истина, словно завет, переданный сквозь время. В этих словах скрыта не просто предосторожность, а целая философия человеческой судьбы: ум – это не просто дар, а ответственность и порой бремя. Быть умным – значит идти своим путем, не всегда понятным и легким, но истинным и честным. А глупость, увы, часто маскируется под уверенность, объединяет и создает иллюзию силы и единства, затмевающих свет разума.

Для нас Ирина Борисовна – пример именно такого подлинного ума, который не боится преград, поскольку он ищет истину и не поддается соблазну легких ответов и массовых заблуждений. Ее наставничество – не только передача знаний, но и урок мужества, стойкости и честности перед самим собой и наукой. Спасибо Вам за то, что помогаете нам не бояться становиться умнее, не бояться идти своим путем и видеть за словами и фактами глубину и смысл. Ваш пример вдохновляет нас стремиться к настоящему пониманию и не останавливаться перед трудностями.

С уважением и благодарностью, аспиранты Григорий Бажутин, Максим Полыгалов и Семен Тянь.

Правило № 9. «Не забывать, что у жизни короткая программа, поэтому надо научиться реально оценивать свое время, уметь переключаться и чем дальше, тем глубже соблюдать приемлемый баланс между личной жизнью и работой».

Жизнь действительно устроена таким образом, что ее ритм стремительно течет вперед, словно река, торопливо несущая воду мимо берегов. Время неумолимо, и лишь мудрый человек способен грамотно распределять свои ресурсы, осознавая ценность каждого мгновения.

Дорогая Ирина Борисовна! Мы глубоко признательны Вам за напутствие, которое искренне восприняли как руководство к действию. Ваш жизненный опыт и профессиональные достижения вдохновляют нас стремиться к гармонии между профессиональной деятельностью и личным счастьем. Ваше понимание важности умения управлять временем и находить равновесие – бесценный урок, который помогает нам становиться лучше как специалистам и личностям.

Ваш пример учит нас осознавать ценность каждого момента, рационально распределять усилия и ценить каждый миг своей жизни. Мы будем стараться следовать этому правилу, достигать успеха на работе, сохраняя любовь и радость дома. Спасибо Вам огромное за заботу, внимание и поддержку!

С благодарностью и искренней нежностью, к.б.н. Людмила Литвиненко и Мария Филиппова.

Правило № 10.

Формулируя свои «Правила жизни», Ирина Борисовна особо выделила одно из главных – желание любого человека быть счастливым. Разделяя мнение великого русского полководца М.И. Кутузова, что вопрос счастья – это «... коллекционировать хорошее, что есть в мире, в душе своей, в других людях», академик Ившина раскрывает его, как никакое другое. Но почему этот рецепт счастья, эта истина, спасающая во все времена, постигается людьми столь мучительно и имеет, по мнению Ирины Борисовны, множество преград на пути к ней? Как выдержать испытание временем, не сломаться, не струсить и быть счастливым, занимаясь наукой? Отвечая на эти основополагающие вопросы, мы берем на вооружение совет Учителя: «...Накапливая в своей душе все хоро-

шее, что есть в мире, адаптироваться и, в конце концов, сопротивляясь предлагаемым обстоятельствам, добиваться истинных результатов в науке».

Оглядываясь назад, мы вспоминаем долгий и непростой путь (без малого 40 лет), что прошли вместе с коллективом и всей страной в стенах Лаборатории алканотрофных микроорганизмов ИЭГМ УрО РАН под руководством профессора И.Б. Ившиной. Прошли именно так, через адаптацию и сопротивление, черпая силы и знания от Ирины Борисовны, испытывая радость и восторг открытий, изучая и накапливая то, что стало в настоящее время Коллекцией мирового уровня. Спасибо, Учитель, за все!

С благодарностью и уважением, к.б.н. Татьяна Каменских и к.б.н. Марина Рычкова.

***Правило № 11.** «Времена меняются, но всегда актуально: “Понимать, что справедливо; чувствовать, что прекрасно; желать, что хорошо, – вот цель разумной жизни” (Платон)».*

Это правило мы воспринимаем как ориентир для работы и жизни в науке. Для нас быть учеными – значит не только стремиться к новым открытиям, но и сохранять внутренний компас справедливости, красоты и добра даже в условиях перемен и вызовов времени.

Информация об авторах

Мария Станиславовна Куюкина – д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник *Rhodococcus*-центра ПГНИУ, профессор кафедры микробиологии и иммунологии ПГНИУ, ведущий научный сотрудник лаборатории алканотрофных микроорганизмов;

Людмила Андреевна Алфимова – переводчик;

Елена Анатольевна Суханова – лаборант;

Полина Юрьевна Мальцева – аспирант, младший научный сотрудник;

Наталья Алексеевна Плотницкая – канд. биол. наук, старший преподаватель, научный сотрудник;

Анастасия Владимировна Криворучко – д-р биол. наук, профессор кафедры микробиологии и иммунологии, научный сотрудник;

Понимать, что справедливо, – значит честно оценивать свои поступки, поддерживать коллег и быть требовательными к себе. Чувствовать, что прекрасно, – уметь видеть вдохновение в научных идеях, радоваться успехам команды, ценить красоту природы и гармонию в микромире, который мы изучаем. Желать, что хорошо, – стремиться приносить пользу науке и обществу, поддерживать друг друга, создавать атмосферу доверия и взаимопомощи.

Следуя этому правилу жизни, мы не только развиваемся как профессионалы, но и становимся более чуткими к окружающему миру. Времена действительно меняются, но наши ценности остаются неизменными: справедливость, красота и добро – это те ориентиры, которые ведут нас вперед в нашем научном пути.

С уважением и благодарностью, аспиранты Марина Макарова и Лилия Комарова.

Дорогой наш Учитель! От всей души поздравляем Вас с Юбилеем, выражаем искреннюю благодарность за помощь и заботу, ценные советы и основополагающие уроки, внимание и вдохновение, которые Вы дарите нам каждый день. Ваша мудрость служит ориентиром каждому из нас на пути познания себя и мира вокруг. От всей души желаем Вам здоровья, благополучия и дальнейших успехов в науке и педагогике.

С глубоким уважением, коллектив лаборатории и аспиранты.

Андрей Анатольевич Елькин – канд. биол. наук, декан биологического факультета ПГНИУ, старший научный сотрудник;

Анастасия Анатольевна Гольшева – аспирант, инженер;

Григорий Андреевич Бажутин – младший научный сотрудник;

Максим Александрович Польшгалов – аспирант;

Семен Михайлович Тянь – аспирант, инженер;

Людмила Викторовна Литвиненко – канд. биол. наук, научный сотрудник;

Мария Сергеевна Филиппова – инженер;

Татьяна Никодимовна Каменских – канд. биол. наук;

Марина Ивановна Рычкова – канд. биол. наук;

Марина Витальевна Макарова – аспирант, младший научный сотрудник;

Лилия Павловна Комарова – аспирант, младший научный сотрудник.

Information about the authors

María S. Kuyukina – Doctor of Biology, leading scientist of the *Rhodococcus*-center of the Perm State National Research University, professor of the Microbiology and Immunology Department, leading scientist of the laboratory of alkanotrophic microorganisms;

Ludmila A. Alfimova – professional translator/interpreter;

Elena A. Sukhanova – technician;

Polina Yu. Maltseva – PhD student, associate scientist;

Natalia A. Plotnitskaya – PhD, senior lecturer researcher;

Anastasiia V. Krivoruchko – Doctor of Biology, professor of the Microbiology and Immunology Department, researcher;

Andrey A. Elkin – PhD, dean of the Biology Faculty of the Perm State National Research University, senior researcher;

Anastasiia A. Golysheva – PhD student, technician;

Grigoriy A. Bazhutin – associate scientist;

Maksim A. Polygalov – PhD student;

Semen M. Tyan – PhD student, technician;

Ludmila V. Litvinenko – PhD, researcher;

María S. Philippova – technician;

Tatiana N. Kamenskikh – PhD;

Marina I. Richkova – PhD;

Marina V. Makarova – PhD student, associate scientist;

Lilya P. Komarova – PhD student, associate scientist.