

**Естественные
и
технические
науки[®]**

№ 8 (195) 2024 г.

ISSN 1684-2626

**Журнал «Естественные и технические науки» входит
в Перечень ВАК РФ и Международную базу данных
и систему цитирования Chemical Abstracts.**

Журнал публикует основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и на соискание ученой степени доктора наук по естественным и техническим наукам. В соответствии с пунктом 5 Правил издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования, считаются включенными в Перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю. При рассмотрении вопроса о присвоении ученого звания публикации соискателя ученого звания в данных изданиях засчитываются в качестве научных трудов, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень (на основании пункта 5 Правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, утвержденных приказом Минобрнауки России от 12.12.2016 № 1586, и письма Минобрнауки МН-06.2/1059 от 08.11.2018).

Учредитель – Издательство «Спутник+»

Компьютерный набор и верстка – Д. Абдулвахидова

Адрес редакции: 109052, Москва, Смирновская улица, д. 4, стр. 2

Телефон: (495) 730-47-74, 778-45-60, 730-48-71 (с 9 до 18, обед с 14 до 15)

E-mail: print@sputnikplus.ru

**Издание зарегистрировано
Министерством Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций**

**Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-39983 от 20 мая 2010 г.**

Объем 23,25 печ. л.
Тираж 1000 экз. Заказ № 173.
Подписано в печать 30.08.2024.

Отпечатано в ООО «Издательство «Спутник+»

Порядок направления, рецензирования и опубликования научных статей

На основании решения редакционной коллегии журнала
«Естественные и технические науки» № 03 от 01.12.08 утвержден следующий
Порядок рецензирования статей, поступивших в редакцию журнала:

1. Статью необходимо направлять на электронный или почтовый адрес редакции. Поступающая в редакцию статья рассматривается на предмет соответствия профилю журнала, требованиям к оформлению и регистрируется с присвоением ей индивидуального номера. Редакция в течение 3-х дней уведомляет авторов о получении рукописи статьи. Рукописи, оформленные не должным образом, не рассматриваются.

2. Рукописи всех статей, поступивших в редакцию журнала, подлежат обязательному рецензированию. К рецензированию привлекаются ученые, доктора наук, обладающие неоспоримым авторитетом в сфере научных знаний, которой соответствует рукопись статьи, имеющие в течение последних 3-х лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет. Рецензентом не имеет права быть автор (или один из авторов) рецензируемой статьи. Рецензенты информируются о том, что рукописи статей являются частной собственностью их авторов и представляют собой сведения, исключающие их разглашение и копирование.

3. В случаях, когда редакция журнала не располагает возможностью привлечь к рецензированию эксперта подходящего уровня в сфере знаний, к которой имеет отношение рукопись, редакция обращается к автору с просьбой предоставить внешнюю рецензию. Внешняя рецензия предоставляется при подаче статьи (что, тем не менее, не исключает принятый порядок рецензирования). Рецензии обсуждаются редколлегией, являясь причиной для принятия или отклонения рукописей. Рукопись, адресуемая в редакцию, также может сопровождаться письмом из направляющей организации за подписью ее руководителя.

4. Рецензия должна беспристрастно давать оценку рукописи статьи и заключать в себе исчерпывающий разбор ее научных достоинств и недостатков. Рецензия составляется по предлагаемой редакцией форме или в произвольном виде и должна освещать следующие моменты: научную ценность результатов исследования, актуальность методов исследования и статистической обработки данных, уровень изучения научных источников по теме, соответствие объема рукописи статьи в целом и отдельных ее элементов в частности, т.е. текста, таблиц, иллюстраций, библиографических ссылок. В завершающей части рецензии необходимо изложить аргументированные и конструктивные выводы о рукописи и дать ясную рекомендацию о необходимости либо публикации в журнале, либо переработки статьи (с перечислением допущенных автором неточностей и ошибок).

5. Если в рецензии на статью сделан вывод о необходимости ее доработки, то она направляется автору на доработку вместе с копией рецензии. При несогласии автора с выводами рецензента, автор вправе обратиться в редакцию с просьбой о повторном рецензировании или отозвать статью (в этом случае делается запись в журнале регистрации). Тогда новой датой поступления в редакцию журнала доработанной статьи считается дата ее возвращения. Доработанная статья направляется на повторное рецензирование тому же рецензенту. Редакция журнала оставляет за собой право отклонения рукописи статьи в случае неспособности или нежелания автора учесть пожелания рецензента.

6. Срок рецензирования между датами поступления рукописи статьи в редакцию и вынесения редколлегией решения в каждом отдельном случае определяется ответственным секретарем с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статьи, но не более 2-х месяцев со дня получения рукописи.

7. Рецензии на статьи предоставляются редакцией экспертным советам в ВАК по их запросам.

8. Редакция журнала не сохраняет рукописи статей, не принятые к публикации. Рукописи статей, принятые к публикации, не возвращаются.

9. Редакция издания направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Главный редактор: Хавкин А.Я.

Редакционная коллегия журнала:

А.Я. Хавкин

главный редактор, доктор технических наук, профессор Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Российского университета дружбы народов, Университета г. Линьи (Китай), Почетный нефтяник РФ, лауреат премии Миннефтепрома СССР, лауреат премии им. академика И.М. Губкина, лауреат премии им. Н.К. Байбакова, кавалер медали ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий»

Т.П. Анцупова

доктор биологических наук, профессор кафедры неорганической и аналитической химии Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный работник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления

А.И. Белолобцев

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева

С.С. Валеев

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики Уфимского государственного авиационного технического университета

И.А. Гарагаиш

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геомеханики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике

О.А. Графский

доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники и компьютерной графики Дальневосточного государственного университета путей сообщения

А.В. Дерюгина

доктор биологических наук, доцент, заведующая кафедрой физиологии и анатомии, заместитель директора по научной работе Института биологии и биомедицины, ведущий научный сотрудник лаборатории по разработке методов нейропротекции Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

В.А. Завьялов

доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и электроснабжения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

С.Н. Золотухин

доктор биологических наук, профессор кафедры микробиологии, вирусологии, эпизоотологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, декан факультета ветеринарной медицины и биотехнологии Ульяновского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, Заслуженный деятель науки и техники Ульяновской области

И.И. Иванов

доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории общей биофизики кафедры биофизики биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, лауреат Государственной премии СССР (1983)

<i>Е.А. Калашиникова</i>	доктор биологических наук, профессор кафедры генетики, биотехнологии, селекции и семеноводства Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева
<i>Ю.Г. Калпин</i>	доктор технических наук, профессор кафедры кузовостроения и обработки давлением Московского государственного технического университета «МАМИ»
<i>В.Ф. Касьянов</i>	доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической эксплуатации зданий Московского государственного строительного университета, Заслуженный работник высшей школы РФ, Почетный работник профессионального высшего образования РФ, Почетный строитель России и г. Москвы, Почетный работник ЖКХ России
<i>Т.А. Краснова</i>	доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой аналитической химии и экологии Кемеровского технологического института пищевой промышленности, Почетный работник Высшей школы, Заслуженный эколог РФ
<i>Т.В. Мальцева</i>	доктор физико-математических наук, профессор, зам. директора по науке и инновациям Строительного института Тюменского индустриального университета
<i>Л.Г. Моисейкина</i>	доктор биологических наук, профессор Калмыцкого государственного университета им. Б.Б. Городовикова, Почетный работник высшего образования РФ
<i>А.Н. Николаев</i>	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств Казанского государственного технологического университета, профессор кафедры теоретических основ теплотехники Казанского государственного технического университета
<i>Ю.Р. Осипов</i>	доктор технических наук, профессор кафедры теории и проектирования машин и механизмов Вологодского государственного технического университета, Почетный работник высшего образования РФ
<i>О.А. Решетник</i>	доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой технологии пищевых производств Казанского государственного технологического университета, член Общества биотехнологов России им. Ю.А. Овчинникова, член Российского отделения Общества микробиологов, Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан
<i>О.И. Ручкина</i>	доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и водоснабжения Пермского национального исследовательского политехнического университета
<i>Ф.Н. Сарапулов</i>	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электротехнологических систем Уральского государственного технического университета
<i>Н.С. Снегирева</i>	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института прикладной механики РАН, изобретатель СССР
<i>В.В. Стогний</i>	доктор геолого-минералогических наук, профессор Кубанского государственного университета

<i>Д.И. Стом</i>	доктор биологических наук, профессор кафедры гидробиологии и зоологии беспозвоночных Иркутского государственного университета, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института биологии при Иркутском государственном университете, Изобретатель СССР, Заслуженный работник высшей школы РФ
<i>А.В. Ткачев</i>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры ветеринарной медицины Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, старший научный сотрудник
<i>А.В. Хортов</i>	доктор геолого-минералогических наук, профессор, научный сотрудник Института Океанологии РАН им. П.П. Ширшова
<i>А.А. Хусаинов</i>	доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, Почетный работник высшего профессионального образования РФ
<i>Т.А. Цехмистренко</i>	доктор биологических наук, профессор кафедры анатомии человека медицинского факультета Российского университета дружбы народов, Почетный работник высшего профессионального образования РФ
<i>В.Я. Шапиро</i>	доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры высшей математики Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии
<i>В.Н. Шапран</i>	доктор технических наук, профессор кафедры двигателей Рязанского военного автомобильного института

Уважаемые подписчики!

Вы можете подписаться на любой из наших журналов. Подписка производится как в России, так и за ее пределами.

Подписные индексы наших журналов:

- 1. «Актуальные проблемы современной науки» – № T1080**
- 2. «Аспирант и соискатель» – № T1076**
- 3. «Вопросы гуманитарных наук» – № T1072**
- 4. «Естественные и технические науки» – № ПН215**
- 5. «Педагогические науки» – № T1079**
- 6. «Современные гуманитарные исследования» – № T1077**

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Математика и механика

Механика жидкости, газа и плазмы

Алиев И.М. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова; Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук), Николаева С.Г. (Казанский государственный энергетический университет), Валеев С.И. (Казанский национальный исследовательский технологический университет)

Исследование характера распределения линий тока по сечению газопромывателя..... 12

Батухтин А.Г. (Забайкальский государственный университет), Вассунова Ю.Ю. (Казанский государственный энергетический университет), Османова М.Х. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

Вывод уравнения движения частицы с учетом аэродинамики газового потока..... 16

Батухтин А.Г. (Забайкальский государственный университет), Лаптева Е.А. (Казанский государственный энергетический университет), Батухтин С.Г. (Забайкальский государственный университет)

Математическое моделирование движения частиц в цилиндрической системе координат..... 20

Моделирование движения твердых частиц в закрученном потоке 23

Батухтин А.Г. (Забайкальский государственный университет), Мусина Л.Ф. (Казанский государственный энергетический университет), Барановская М.Г. (Забайкальский государственный университет)

Численное моделирование многофазных течений в Ansys CFX 26

Зайтов Р.И. (Казанский государственный энергетический университет), Дадашева З.И. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова), Валеев С.И. (Казанский национальный исследовательский технологический университет)

Инновационная технология: оптимизированная гидродинамика для улучшения очистки газа 29

Тюрина М.М. (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ), Хуснутдинов А.Н. (Казанский государственный энергетический университет), Шуртуев М.М. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

Визуальное моделирование структуры течения потока в газопромывателе..... 32

Успажиев Р.Т. (Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова), Харченко С.Б. (Казанский государственный энергетический университет), Валеев С.И. (Казанский национальный исследовательский технологический университет)

Анализ закономерностей гидравлического сопротивления в барботажно-вихревом аппарате.... 36

Компьютерные науки и информатика

Искусственный интеллект и машинное обучение

Максимов А.И., Молодов В.А., Перминов А.Ю., Фоменко Н.С., Самарин А.Р., Маруев А.Д. (Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы)

Нейросетевые и онтологические модели искусственного интеллекта в задачах автоматической обработки медицинской документации 39

Физические науки

Физика конденсированного состояния

Калимуллин Р.И. (Казанский государственный энергетический университет), Алихаджиев С.Х. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова), Абубакаров А.Г. (Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика)

Влияние нестехиометрии состава на диссипативные свойства BiFeO_3 44

Биологические науки

Физиология человека и животных

Игенов М.Д., Новик Я.В., Ухлова А.В., Мотин А.Г. (Новосибирский государственный аграрный университет)

Влияние витаминно-минерального комплекса с пробиотиком на морфологические показатели крови волнистых попугайчиков 48

Камшилова О.А. (Областная клиническая больница № 2, г. Тюмень), Прокопьев Н.Я. (Тюменский государственный университет), Ананьев В.Н. (Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук), Ананьева О.В., Пашкина И.В. (Тюменский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации)

Адаптационный потенциал у женщин периода пожилого возраста при коморбидной патологии до и после магнитных бурь 54

Биотехнология

Худайгулов Г.Г., Шарипов Д.А., Стариков С.Н., Четвериков С.П. (Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук)

Бактериальные ассоциации для эффективного разложения перфторкарбоновых кислот 59

Черкашина С.В., Мальцева И.А., Цюпа Е.А. (Мелитопольский государственный университет), Яковийчук А.В. (Мелитопольский государственный университет; Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук)

*Оценка потенциала биофиксации углекислого газа *Chlorococcum oleofaciens* (Chlorophyceae, Chlorophyta) в условиях питательного стресса* 63

Ботаника

Ложкина-Гамецкая Н.И., Моисеева Е.А. (Сургутский государственный педагогический университет), Бордей Р.Х. (Сургутский государственный университет)

Сравнительная оценка биологических особенностей сорта «СК Артика», интродуцированной в различные почвенно-климатические условия 72

Руденко И.В. (Кубанский государственный университет; Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина), Пикалова Н.А. (Кубанский государственный университет), Криворотов С.Б. (Кубанский государственный университет; Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина)

Новые и редко встречающиеся в Краснодарском крае виды сосудистых растений в окрестностях х. Ильич (Отраденский район)..... 81

Экология

Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В., Лузина М.С., Овсянникова И.В., Пряничникова В.В. (Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке))

Лабораторный анализ снежного покрова промышленного города..... 92

Голубева Е.И., Тульская Н.И., Глухова Е.В. (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

Дополнительное профессиональное образование в сфере экологии и рационального природопользования: новые возможности и перспективы..... 96

Набиева М.А., Гаджиева С.Р., Шамилов Н.Т., Алиева Т.И. (Бакинский государственный университет, Азербайджан)

Eco-chemical study of water samples taken from Sabirabad area of Araz river..... 100

Пакукина А.П. (Дальневосточный государственный аграрный университет), Платонова Т.П. (Амурский государственный университет), Гуленова Т.В. (Дальневосточный государственный аграрный университет)

Птицы как индикаторы экологического состояния окружающей среды 108

Психиатрия и наркология

Кирихин О.Л., Кирихина Л.Б., Мартынова Е.О., Урясьев О.М. (Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова Министерства здравоохранения Российской Федерации)

Транскраниальная электротерапия в лечении психических заболеваний..... 113

Фармакология, клиническая фармакология

Меджидова К.К., Магомедова Р.М., Багомедова М.Б., Чижиков А.А., Алхазова Р.Т. (Дагестанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации)

Оценка анальгетического эффекта трициклического антидепрессанта у пациентов с хронической неспецифической болью в пояснице..... 123

Науки о Земле и окружающей среде

Общая и региональная геология.

Геотектоника и геодинамика

Митрохин А.Н., Уткин В.П., Неволлин П.Л. (Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук)

Структурно-динамические и геохимические аспекты пространственного распределения калия на предрудном этапе формирования Комсомольского рудного района..... 127

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Королёв А.Э., Королёв Э.А. (Казанский (Приволжский) федеральный университет), Бариева Э.Р., Замалетдинов Р.И. (Казанский государственный энергетический университет)

Проявление карстово-суффозионных процессов на участке вблизи села Нижние Вязовые..... 132

Геоэкология

Кузнецова О.Г. (Школа № 1212, г. Москва)

К вопросам особо охраняемых зеленых территорий 135

Семенов М.Ю., Маринайте И.И., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. (Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук)

Состав полициклических ароматических углеводов воздуха, поверхностных вод, донных отложений и почв Байкальской природной территории..... 139

Семенов М.Ю., Маринайте И.И. (Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук), Семенов Ю.М. (Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук)

Происхождение полициклических ароматических углеводов в поверхностных водах и донных отложениях Байкальской природной территории 144

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Строительство и архитектура

Безопасность объектов строительства

Никитин И.С. (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), Марков А.Г. (Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий)

Оценка влияния внутреннего покрытия печи для испытания строительных конструкций на установление температурного режима..... 149

Энергетика и электротехника

Энергетические системы и комплексы

Гарифуллина Н.А. (Казанский государственный энергетический университет), Алихаджиев С.Х. (Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

Проектирование и оптимизация лопастей турбин для бесперебойного использования возобновляемых источников энергии..... 152

Химические технологии, науки о материалах, металлургия

Процессы и аппараты химических технологий

Успажиев Р.Т. (Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова), Саниева А.Д. (Казанский государственный энергетический университет)

Внедрение и технико-экологическая оценка работы газопромывателя 155

Недропользование и горные науки

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Алекина Е.В., Борисевич Ю.П., Хохлова Н.Ю. (Самарский государственный технический университет)

Анализ результатов обучения сверхточной нейронной сети для распознавания и оценки утечек природного газа на объектах нефтегазовой отрасли РФ с помощью дистанционного зондирования Земли..... 158

Анализ эффективности поиска утечек природного газа на ПХГ «Кирюшкино» с помощью обученной сверхточной нейронной сети на основе дистанционного зондирования поверхности земли 162

Мараков Д.А., Адзынова Ф.А., Алексеенко И.Д., Скицану Р.А. (Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина), Сулейманов Т.И. (АО «ВНИИнефть-Западная Сибирь», г. Тюмень)

Моделирование процесса конусообразования при эксплуатации горизонтальных газовых скважин 166

Хавкин А.Я. (Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы), Хавкин Б.А. (Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина)

Влияние капиллярных сил на повышение нефтедобычи полимерными растворами 175

Численный анализ ОПР на месторождении Жалгистобе 178

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Математика и механика

Механика жидкости, газа и плазмы

Алиев И.М., кандидат физико-математических наук, доцент

(Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова; Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук)

Николаева С.Г., кандидат технических наук, доцент

(Казанский государственный энергетический университет)

Валеев С.И., кандидат технических наук, доцент

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИЙ ТОКА ПО СЕЧЕНИЮ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯ

В статье представлены результаты гидродинамических расчетов потока вязкой несжимаемой жидкости в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS. Получены картины распределения тангенциальных, осевых и радиальных компонент скорости потока. Проведенные расчеты позволяют определять потенциальные возможности динамического газопромывателя при использовании его в качестве аппарата для очистки газовых выбросов. Полученные результаты используются в уравнениях движения частиц для определения ожидаемой эффективности процесса газоочистки с целью уменьшения энергозатрат при сохранении качества газоочистки.

Ключевые слова: динамический газопромыватель, ANSYS CFX, моделирование, тангенциальная скорость, структура течения.

Aliev I.M.

Nikolaeva S.G.

Valeev S.I.

STUDY OF THE NATURE OF THE STREAMLINES OVER THE CROSS SECTION OF THE SCRUBBER

The article presents the results of hydrodynamic calculations of the flow of a viscous incompressible fluid in the ANSYS CFD package. The patterns of distribution of tangential, axial and radial flow velocity components are obtained. The performed calculations make it possible to determine the potential capabilities of a dynamic scrubber when used as an apparatus for cleaning gas emissions. The results obtained are used in the particle motion equations to determine the expected efficiency of the gas cleaning process in order to reduce energy costs while maintaining the quality of gas cleaning.

Keywords: dynamic scrubber, ANSYS CFX, modeling, tangential speed, flow structure.

Введение

В химической промышленности и смежных с ней отраслях производства используются газоочистные аппараты с закрученным движением дисперсной среды, эффективность которых полностью определяется гидродинамическим совершенствованием процесса сепарации. Основными недостатками известных устройств являются: низкая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц, вторичный унос дисперсной фазы, высокое гидравлическое сопротивление, склонность к залипанию пыли [1]. Применяемые в настоящее время математические модели процессов газоочистки, как правило, сформированы на упрощенных теоретических представлениях о движении потоков газозвеси. Они недостаточно учитывают режимные и конструктивные параметры аппаратов газоочистки, а также аэрогидродинамические свойства газодисперсных потоков. Эти модели не могут быть использованы для поиска оптимальных вариантов комплексных систем газоочистки, так как они показывают свойства объектов в узком диапазоне изменения параметров. Сложность общей гидродинамической картины сепарации многофазных потоков, а также взаимодействие этих потоков между собой, обуславливает трудности ее математического описания. Этим объясняется необходимость исследования влияния режимных и конструктивных параметров на эффективность процесса газоочистки с оценкой вклада отдельных элементов для более детального понимания физического механизма центробежной интенсификации [2]. Применение вычислительных технологий и пакетов программ позволяет рассчитывать с приемлемой для практики точностью гидродинамические характеристики вихревых течений на этапе разработки и проектирования промышленных устройств, в том числе газоочистных, позволяя избежать необходимости дорогостоящих натурных испытаний.

Моделирование движения газодисперсных потоков

Решение математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS [2]. Для постановки задачи моделирования и последующего исследования процессов, протекающих в вихревых центробежных аппаратах, необходимо определить связь между параметрами закручивающего устройства и формируемого им течения. Поскольку численное моделирование трехмерных течений на сегодняшний день является проблематичным, данная задача сливается с известной проблемой характеристик закрученных течений и закручивающих устройств. Численный анализ течения газа внутри динамического газопромывателя [3] сводится к решению системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Для замыкания газодинамических уравнений Навье-Стокса использовалась стандартная $(k - \varepsilon)$ -модель турбулентности. Для нахождения скалярных параметров k и ε используются два дополнительных модельных уравнения, содержащих эмпирические константы [4]. Расчетная сетка была построена в сеточном генераторе *Ansys CFX*. Большинство задаваемых граничных условий могут быть сведены: к условиям первого рода (задано значение функции), к условиям второго рода (задан градиент функции по нормали к границе) или к условиям третьего рода (задается линейная комбинация значений функции и нормальной производной). Постановка граничных условий оказывает существенное влияние не только на устойчивость, но и на точность решения конечноразностного уравнения. Изучению граничных условий на конечной расчетной сетке посвящены работы [5–7], в частности, в [7] показано, что при больших числах Рейнольдса из-за неправильно поставленных граничных условий ошибка на границах может вдвое превышать ошибку аппроксимации во внутренних точках. В работах [8–10] представлены результаты экспериментальных исследований центробежных пылеуловителей со следующими параметрами: число Рейнольдса варьировалось от $1 \cdot 10^2$ до $60 \cdot 10^4$; параметр закрутки изменялся в пределах $K = 0 \div 4$. Проведем расчет течения для динамического газопромывателя и сравним полученные решения с экспериментальными данными.

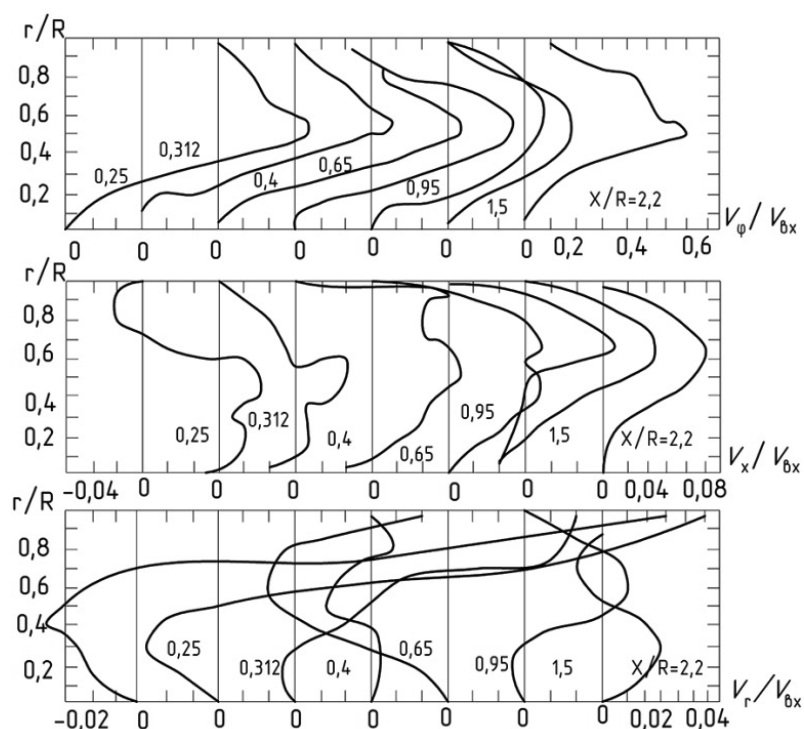


Рис. 1. Проекция тангенциальных, осевых и радиальных скоростей

Задача решалась в осесимметричной постановке, течение предполагалось турбулентным. Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата при числе $Re = 6 \cdot 10^4$ представлены на рис. 1. Профиль тангенциальной скорости имеет форму параболы с максимумом, расположенным ближе к цилиндрической стенке, что можно объяснить действием центробежных сил.

При увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями. Результаты исследований влияния на структуру течения характеристик турбулентных потоков приведены в работах [3, 4].

Выводы

Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе ANSYS CFX. Значения скоростей потока в осевом направлении показывают, что центре потока она имеет фактически постоянное значение, а вблизи выхлопного патрубка образуется достаточно интенсивное течение в пристенном слое. Полученные результаты используются в уравнениях движения частиц для определения ожидаемой эффективности процесса газоочистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков С.Г. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1994. – 168 с.
2. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: АСВ, 1998. – 320 с.
3. Вальдберг А.Ю., Лебедюк Г.К. Мокрые пылеуловители ударного, центробежного и форсуночного действия. – М.:Цинтихимнефтемаш 1981. 38 с.
4. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – С-Пб: Химия, 1993. – 262 с.
5. А.А. Самарский. Методы решения сеточных уравнений. 592. (1978).
6. Xia J.L. Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, V. 41. 11. 1485-1497. (1998).

7. *С.К. Бетяев*. Математические модели неосесимметричного вихря. ТОХТ. Т.36. 2.124 – 129. (2002).
8. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, USA (1993).
9. *В.Д. Горячев*. Моделирование работы инерционного вихревого сепаратора на ЭВМ. Известия вузов. 2. 49–55. (1980).
10. *Menter F.R.* Advanced Turbulence Modelling in CFX. CFX Update – Spring. 20. 4–5. (2002).

Батухтин А.Г., доктор технических наук,
доцент, декан факультета
(Забайкальский государственный универ-
ситет)

Вассунова Ю.Ю., кандидат технических
наук, доцент
(Казанский государственный энергетиче-
ский университет)

Османова М.Х., ассистент
(Чеченский государственный универси-
тет имени Ахмата Абдулхамидовича
Кадырова)

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИКИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Установлено, что основные показатели газоочистки в динамическом газопромывателе зависят от гидродинамической обстановки, в частности от значений тангенциальной скорости газодисперсного потока, определяющей причину сепарации. Приведен расчёт траекторий движения частиц, который позволит найти условия их улавливания и количественно определить влияние аэродинамики потока на процесс газоочистки.

Ключевые слова: газоочистка, траектория частиц, уравнение движения, осевая скорость, система координат, газопромыватель.

Batukhtin A.G.
Vassunova Yu.Yu.
Osmanova M.H.

DERIVATION OF THE PARTICLE MOTION EQUATION TAKING INTO ACCOUNT THE AERODYNAMICS OF THE GAS FLOW

It has been established that the main indicators of gas cleaning in a dynamic scrubber depend on the hydrodynamic situation, in particular, on the values of the tangential velocity of the gas-dispersed flow, which determines the cause of separation. The calculation of the particle motion trajectories is presented, which will allow finding the conditions for their trapping and quantitatively determine the influence of the flow aerodynamics on the gas cleaning process.

Keywords: gas cleaning, particle trajectory, equation of motion, axial speed, coordinate system, scrubber.

Введение

С момента появления газопромывателей с активной гидродинамикой перед исследователями стояла задача – спрогнозировать параметры работы, создаваемой ими установки до того, как чертежи будут отданы в производство. К перспективным методам повышения эффективности пылеулавливания мелкодисперсных частиц можно отнести мокрую очистку газа [1]. Для этого метода характерны сложные массообменные процессы в ходе взаимодействия газодисперсного потока с каплями орошающей жидкости, в результате чего изменяются скорость и концентрация фаз, определяющие газоочистку. Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной гидродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров [2].

Вывод уравнения движения частицы

Градиент продольной скорости газа приводит к вращению частицы вокруг своей оси и ее поперечному движению, причиной которого является сила Магнуса-Жуковского, направленная перпендикулярно вектору относительной скорости в сторону максимального значения суммы тангенциальных составляющих скоростей обтекания и вращения (рис. 1) [3, 4].

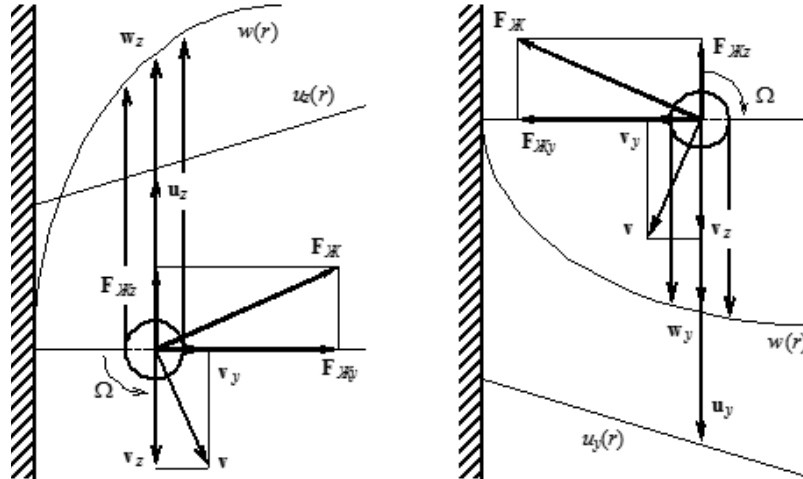


Рис. 1. Вектор скорости движения частицы

$$F_{\text{ж}} = \frac{\pi}{8} \rho d^3 [\Omega \times v]$$

где Ω – угловая скорость вращения частицы, с^{-1} ; v – вектор скорости относительного движения частицы, м/с .

Тогда на частицу кроме сил, связанных с ее обтеканием, и силы тяжести (с учетом силы Архимеда) действует поперечная сила Магнуса-Жуковского, возникающая при вращении частицы вокруг собственной оси из-за градиента скорости газа, и уравнение ее движения в векторной форме можно записать в виде:

$$m \frac{du}{dt} = \sum_i F_i = F_{\text{ж}} + F_c + G + F_A$$

где u – вектор скорости частицы, $F_{\text{ж}}$, F_c , G и F_A – векторы сил Магнуса-Жуковского, сопротивления, тяжести и Архимеда.

Положение частицы будем задавать её цилиндрическими координатами $(r; \varphi; z)$. Скорость частицы определим тремя составляющими: U_q – тангенциальная, V_q – радиальная и W_q – аксиальная скорости. Примем систему координат $O'X'Y'Z'$, пусть ось $O'X'$ проходит через саму частицу, а ось $O'Z'$ лежит на оси OZ . Принятая система отсчета движется поступательно по оси OZ со скоростью W_q и вращается вокруг нее с угловой скоростью ω .

Уравнение движения частицы массой $m = \frac{1}{6} \pi \rho_q d_q^3$ в системе координат $O'X'Y'Z'$ примет вид:

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{\omega} \cdot [\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}]] + 2m[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}] \quad (1)$$

Слагаемые, входящие в (1) определяются как:

$$\begin{aligned}\left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}\right] &= \left[\vec{r}_q \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt}\right] = \left[\vec{r}_q \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{U_q}{r_q} \vec{e}_z\right)\right] = -\vec{r}_q \left(\frac{1}{r_q} \frac{dU_q}{dt} - \frac{U_q}{r_q^2} V_x\right) \vec{e}_y = \left(-\frac{dU_q}{dt} + \frac{U_q V_x}{r_q}\right) \vec{e}_y \\ \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q^{-1} \cdot \vec{\omega}\right]\right] &= \frac{U_q^2}{r_x} \left[\vec{e}_z \cdot \left[\vec{e}_x \cdot \vec{e}_z\right]\right] = -\frac{U_q^2}{r_q} \left[\vec{e}_z \cdot \vec{e}_y\right] = \frac{U_q^2}{r_q} \vec{e}_x \\ 2\left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}\right] &= 2v_{x'} \left[\vec{e}_{x'} \cdot \vec{\omega}\right] = 2v_{x'} \frac{U_x}{r_q} \left[\vec{e}_{x'} \cdot \vec{e}_z\right] = \left(-2 \frac{U_q V_q}{r_q}\right) \vec{e}_y,\end{aligned}$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ орты системы отсчета и учтено, что $\vec{r}_q = \vec{e}_x \cdot r_q \cdot \vec{e}_x = V_x$

Подставляя эти выражения в уравнение движения (1) получаем

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m\left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}\right] + m\left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}\right] + m\left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}\right]\right] + 2m\left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}\right]$$

Запишем это уравнение в проекциях на оси системы координат O'X'Y'Z'

$$\begin{cases} \frac{dV_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmx} + \frac{U_q^2}{r_q} \\ \frac{dU_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmy} - \frac{U_q V_q}{r_q} \\ \frac{dW_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmz} \end{cases} \quad (2)$$

Мы получили уравнение движения частицы во вращающемся газовом потоке в проекциях на оси цилиндрической системы. Полученные результаты, описывающие характер движения одиночной частицы, соответствуют экспериментальным наблюдениям [5].

Выводы

Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволило оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в аппаратах центробежного типа, а также создать методику оценки эффективности газопромывателя. Разработанная модель может быть использована при расчете и конструировании аппаратов газоочистки, так как составляющие её соотношения определяют связь между технологическими характеристиками пылеуловителей и их конструктивными параметрами.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement No. 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023)

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. Roshan*, “Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine” *J. Energy Resour. Technol.* 142 (1), 20-27 (2020).
2. *M. Asadi* *Energy Convers. Manage.* 238, 114–119 (2021).
3. *Y. Kyojuka*, *J. Fluid Sci. Technol.* 3, 439–449 (2008).
4. *G. Bangga*, “The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines,” *Adv. Theory Simul.* 4, 200–204 (2021).
5. *Y. Wang*, “Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine” *Renewable Energy* 126, 801-818 (2018).

*Батухтин А.Г., доктор технических наук,
доцент, декан факультета
(Забайкальский государственный универ-
ситет)*

*Лаптева Е.А., кандидат технических
наук, доцент
(Казанский государственный энергетиче-
ский университет)*

*Батухтин С.Г., кандидат технических
наук, доцент
(Забайкальский государственный универ-
ситет)*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Разработка математической модели движения дисперсных частиц в закрученном потоке позволило произвести оценку влияния различных факторов на эффективность улавливания пыли в аппаратах центробежного типа, а также создать методику расчёта эффективности газоочистки. Расчет траекторий частиц по данной модели позволит найти условия их захвата и количественно оценить влияние ключевых факторов на процесс газоочистки.

Ключевые слова: *газоочистка, траектория частиц, уравнение движения частицы, осевая скорость, система координат.*

Batukhtin A.G.

Lapteva E.A.

Batukhtin S.G.

MATHEMATICAL MODELING OF PARTICLE MOTION IN A CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

The developed model can be used in the calculation and design of gas cleaning devices, since the ratios of its components determine the relationship between the technological characteristics of dust collectors and their design parameters. A theoretical model of the motion of a single particle in a cylindrical coordinate system has been developed for various values of the working and design parameters of gas purification.

Keywords: *gas cleaning, particle trajectory, particle motion equation, axial velocity, coordinate system.*

Введение

Одними из наиболее распространенных устройств газоочистой техники считаются аппараты центробежного типа. Их широкое применение обусловлено простотой устройства и надежностью в эксплуатации при небольших капитальных и эксплуатационных затратах.

К перспективным методам повышения эффективности пылеулавливания мелкодисперсных частиц можно отнести мокрую очистку газа [1]. Для этого метода характерны сложные массообменные процессы в ходе взаимодействия газодисперсного потока с каплями орошающей жидкости, в результате чего изменяются скорость и концентрация фаз, определяющие газоочистку. Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной гидродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров [2].

Вывод уравнения движения частицы

Для расчёта траекторий частиц необходимо знать их уравнения движения. Такая задача для некоторого частного случая решается авторами [3, 4]. Введем систему координат OXYZ. Её ось OZ направим вдоль оси симметрии газопромывателя (см. рис.1).

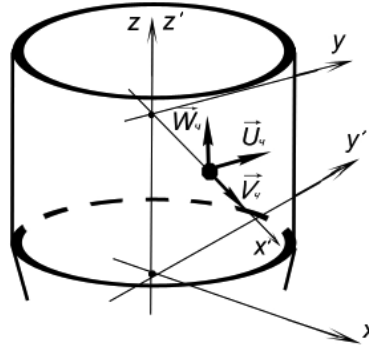


Рис. 1. Вектор скорости движения частицы

Положение частицы будем задавать её цилиндрическими координатами (r ; φ ; z). Скорость частицы определим тремя составляющими: U_q - тангенциальная, V_q - радиальная и W_q - аксиальная скорости. Примем систему координат O'X'Y'Z', пусть ось O'X' проходит через саму частицу, а ось O'Z' лежит на оси OZ. Принятая система отсчета движется поступательно по оси OZ со скоростью W_q и вращается вокруг нее с угловой скоростью ω .

Уравнение движения частицы массой $m = \frac{1}{6} \pi \rho_q d_q^3$ в системе координат O'X'Y'Z' примет вид:

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{r}_q' \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{\omega} \cdot [\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}]] + 2m[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}] \quad (1)$$

Слагаемые, входящие в (1) определяются как:

$$[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}] = [\vec{r}_q' \cdot \vec{\omega}] = \left[\vec{r}_q' \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{U_q}{r_q} \vec{e}_z \right) \right] = -\vec{r}_q' \cdot \left(\frac{1}{r_q} \frac{dU_q}{dt} - \frac{U_q}{r_q^2} V_x \right) \vec{e}_y = \left(-\frac{dU_q}{dt} + \frac{U_q V_q}{r_q} \right) \vec{e}_y$$

$$[\vec{\omega} \cdot [\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}]] = \frac{U_q^2}{r_x} [\vec{e}_z \cdot [\vec{e}_x \cdot \vec{e}_z]] = -\frac{U_q^2}{r_q} [\vec{e}_z \cdot \vec{e}_y] = \frac{U_q^2}{r_q} \vec{e}_x$$

$$2[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}] = 2v_{x'} [\vec{e}_{x'} \cdot \vec{\omega}] = 2v_{x'} \frac{U_x}{r_q} [\vec{e}_{x'} \cdot \vec{e}_{z'}] = \left(-2 \frac{U_q V_q}{r_q} \right) \vec{e}_y$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ орты системы отсчета и учтено, что $\vec{r}_q' = \vec{e}_x \cdot r_q \cdot v_x = V_x$

Подставляя эти выражения в уравнение движения (1) получаем

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{r}_q' \cdot \vec{\omega}] + m[\vec{\omega} \cdot [\vec{r}_q \cdot \vec{\omega}]] + 2m[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega}]$$

Запишем это уравнение в проекциях на оси системы координат O'X'Y'Z'

$$\begin{cases} \frac{dV_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmx} + \frac{U_q^2}{r_q} \\ \frac{dU_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmy} - \frac{U_q V_q}{r_q} \\ \frac{dW_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmz} \end{cases} \quad (2)$$

Мы получили уравнение движения частицы во вращающемся газовом потоке в проекциях на оси цилиндрической системы. Полученные результаты, описывающие характер движения одиночной частицы, соответствуют экспериментальным наблюдениям [5].

Выводы

Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволило оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в аппаратах центробежного типа, а также создать методику оценки эффективности газопромывателя. Разработанная модель может быть использована при расчете и конструировании аппаратов газоочистки, так как составляющие её соотношения определяют связь между технологическими характеристиками пылеуловителей и их конструктивными параметрами.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement No. 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023)

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Roshan, “Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine” J. Energy Resour. Technol. 142 (1), 20-27 (2020).
2. M. Asadi Energy Convers. Manage. 238, 114–119 (2021).
3. Y. Kyojuka, J. Fluid Sci. Technol. 3, 439–449 (2008).
4. G. Bangga, “The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines,” Adv. Theory Simul. 4, 200–204 (2021).
5. Y. Wang, “Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine” Renewable Energy 126, 801–818 (2018).

Батухтин А.Г., доктор технических наук,
доцент, декан факультета
(Забайкальский государственный универ-
ситет)

Лаптева Е.А., кандидат технических
наук, доцент
(Казанский государственный энергетиче-
ский университет)

Батухтин С.Г., кандидат технических
наук, доцент
(Забайкальский государственный универ-
ситет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

В статье рассматривается решение математической модели движения газодисперсных потоков в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS. Предложенная аналитическая модель позволяет рассчитать распределение всех компонент скорости U_φ , U_r , U_x , а также функции тока $\psi(r,z)$ и построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе ANSYS. Представлены характерные картины линий тока для рассчитанных течений. Зависимости, полученные теоретически, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными, их расхождение находится в диапазоне до 7%. Результаты моделирования используются в уравнениях движения частиц для определения ожидаемой эффективности процесса газоочистки.

Ключевые слова: динамический газопромыватель, ANSYS CFX, моделирование, эффективность газоочистки, движение частиц.

Batukhtin A.G.

Lapteva E.A.

Batukhtin S.G.

SIMULATION OF THE MOTION OF SOLID PARTICLES IN A SWIRLING STREAM

The article considers the solution of a mathematical model of the motion of gas-dispersed flows in the ANSYS computational fluid dynamics package. The proposed analytical model makes it possible to calculate the distributions of all components of the velocity U_φ , U_r , U_x , as well as the current function $\psi(r,z)$, and to construct a characteristic hydrodynamic flow pattern in the ANSYS software package. The characteristic patterns of the current lines for the calculated currents are presented. The qualitative picture obtained theoretically agrees well with the known experimental data, the discrepancy, depending on the flow regime, ranges to 7%. The results obtained are used in particle motion equations to determine the expected efficiency of the gas purification process.

Keywords: dynamic gas washer, ANSYS CFX, simulation, gas cleaning efficiency, particle motion.

Введение

Математическое моделирование, связанное с применением вычислительных технологий, позволяет прогнозировать гидродинамические характеристики аппаратов еще на стадии разработки и проектирования [1]. Целью данной работы является моделирование процесса очистки газа от дисперсных примесей и создание на его основе методики определения ожидаемой эффективности процесса газоочистки.

Моделирование движения газодисперсных потоков

Решение математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS [2].

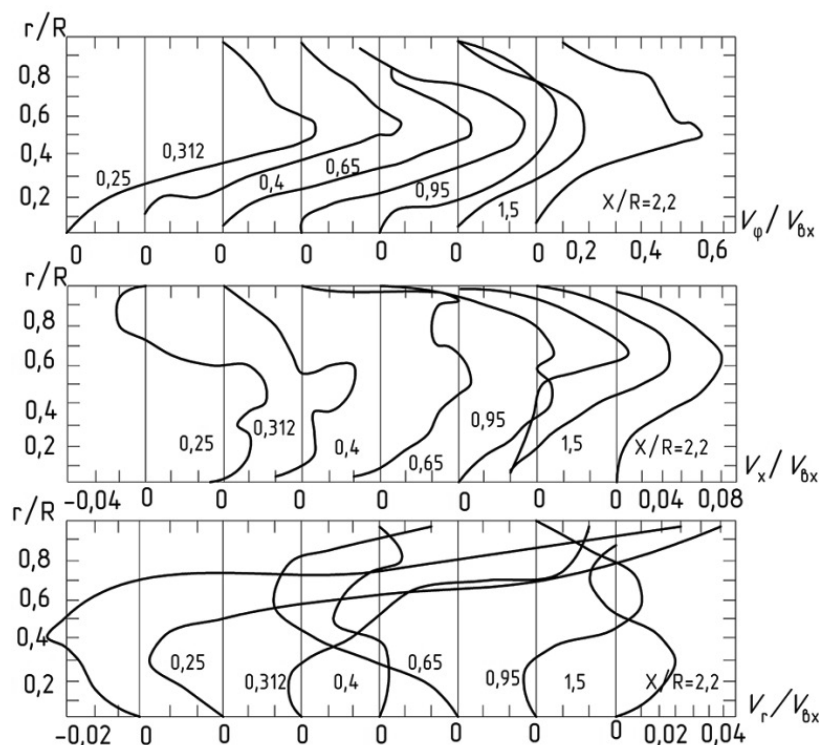


Рис. 1. Проекции тангенциальных, осевых и радиальных скоростей

Задача решалась в осесимметричной постановке, течение предполагалось турбулентным. Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата при числе $Re = 6 \cdot 10^4$ представлены на рис. 1. Профиль тангенциальной скорости имеет форму параболы с максимумом, расположенным ближе к цилиндрической стенке, что можно объяснить действием центробежных сил.

При увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями. Результаты исследований влияния на структуру течения характеристик турбулентных потоков приведены в работах [3, 4].

Для решения поставленной задачи по схеме продольно-поперечной прогонки была разработана расчетная программа. По результатам вычислений были получены профили осевой и окружной компонент скорости (рис. 1).

Картина течения газопылевого потока в динамическом газопромывателе является достаточно сложной ввиду того, что в центральной части аппарата расположен лопастной завихритель. Анализ гидродинамики и распределения осаждаемых частиц в динамическом газопромывателе показал, что из-за наличия турбулентной диффузии, частицы концентрируются у стенки аппарата не плотным слоем, а в виде разрыхленного концентрированного газопылевого слоя. При этом на стенке не образуется осыпавшийся слой, а пыль локализуется в кольцевом при стенном слое определенной толщины в виде спиральных пылевых скоплений в форме жгутов. Инициатором образования спиральных пылевых жгутов является лопастной завихритель. При прохождении пыли через лопасти завихрителя происходит концентрирование частиц на периферийной зоне лопаток. Таким образом, однородный поток после прохождения лопастного завихрителя разделяется на ряд параллельных потоков с чередующейся то обедненной, то обогащенной концентрацией пыли. Толщина и плотность пристенного слоя зависят от скорости газа,

угла закрутки, характера ввода потока в динамический газопромыватель. Более высокие скорости способствуют уменьшению толщины пристенного слоя, несмотря на возрастающую при этом роль турбулентной диффузии. Положение центра вращательного потока не совпадает полностью с геометрической осью аппарата, т.е. имеет место определенный незначительный эксцентриситет, величина которого не превышает 8- 10% от радиуса аппарата. Наличие подобного эксцентриситета закрученного потока отмечают также исследователями.

Выводы

Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе ANSYS CFX. Значения скоростей потока в осевом направлении показывают, что центре потока она имеет фактически постоянное значение, а вблизи выхлопного патрубка образуется достаточно интенсивное течение в пристенном слое. Полученные результаты используются в уравнениях движения частиц для определения ожидаемой эффективности процесса газоочистки.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement No. 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023)

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков С.Г. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1994. –168 с.
2. Штокман Е.А. Очистка воздуха. - М.: АСВ, 1998. –320 с.
3. Вальдберг А.Ю., Лебедюк Г.К. Мокрые пылеуловители ударного, центробежного и форсуночного действия. – М.:Цинтихимнефтемаш 1981. 38 с.
4. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – С-Пб: Химия, 1993. – 262 с.

Батухтин А.Г., доктор технических наук,
доцент, декан факультета
(Забайкальский государственный университет)

Мусина Л.Ф., преподаватель
(Казанский государственный энергетический университет)

Барановская М.Г., кандидат технических наук,
старший преподаватель
(Забайкальский государственный университет)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ANSYS CFX

В статье представлены результаты численного расчета распределения составляющих скоростей потока по сечению газопромывателя в программном комплексе Ansys. Представлены характерные картины линий тока для рассчитанных течений. Анализ полученных профилей скорости позволяет выявить три характерные области по оси аппарата: область формирования газового потока, область стабильного потока и область демпфирования. В ходе эксперимента подтверждена автомодельность газового потока при различных расходах газа и числах Рейнольдса. Установлено, что профили скоростей не зависят от расхода жидкой и газовой фаз и определяются в основном степенью закрутки потока.

Ключевые слова: динамический газопромыватель, Ansys CFX, моделирование, линии тока, скорость движения частиц.

Batukhtin A.G.

Musina L.F.

Baranovskaya M.G.

NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPHASE FLOWS IN ANSYS CFX

The article presents the results of a numerical calculation of the distribution of flow velocity components over the cross section of the scrubber in the Ansys software package. Characteristic patterns of streamlines for the calculated flows are presented. The analysis of the obtained velocity profiles makes it possible to identify three characteristic regions along the apparatus axis: the region of gas flow formation, the region of stable flow, and the region of damping. The experiment confirmed the self-similarity of the gas flow at various gas flow rates and Reynolds numbers. It has been established that the velocity profiles do not depend on the flow rate of the liquid and gas phases and are determined mainly by the degree of swirling of the flow.

Keywords: dynamic gas washer, Ansys CFX, simulation, gas cleaning efficiency, particle motion.

Введение

Аналитический подход большинства исследователей к описанию гидродинамики инерционных аппаратов основывается на системе уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями неразрывности установившегося осесимметричного закрученного газодисперсного потока [1]. Решение системы уравнений Навье-Стокса математически затруднительно, что обуславливает необходимость применения пакетов программ для численного и визуального моделирования потоков, в частности программного комплекса Ansys.

Визуализация и анализ результатов расчета

Решение математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики Ansys. Визуализировалась динамика изменения картины течения с сохранением координат всех узлов рас-

четной сетки и значений основных параметров течения в этих узлах. Были получены и интегральные параметры расчета, типичные для пылеуловителей: гидравлическое сопротивление, потребляемая мощность, эффективность очистки, закрутка потока [2]. В результате численного эксперимента были получены распределения тангенциальной скорости в продольном сечении рабочего пространства аппарата. Составляющая тангенциальной скорости u_θ существенно меняется по радиусу газопромывателя, что свидетельствует о наличии дифференциального вращения, в результате которого вихревые линии закручиваются по спирали. Для тангенциальной скорости характерен дрейф максимума от периферии к центру и сокращение зоны вынужденного вихря (рис. 1). Профиль тангенциальной скорости имеет форму параболы с максимумом, расположенным ближе к цилиндрической стенке, что можно объяснить действием центробежных сил. Значения скоростей потока в осевом направлении показывают, что центре потока она имеет фактически постоянное значение, а вблизи выхлопного патрубка образуется достаточно интенсивное течение в пристенном слое. Анализ полученных профилей скорости позволяет выявить три характерные области по оси аппарата: область формирования газового потока, область стабильного потока и область демпфирования.

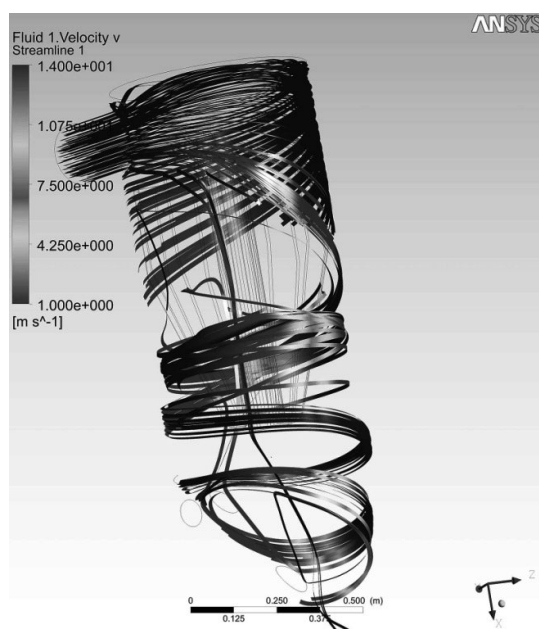


Рис. 1. Проекция тангенциальной скорости в потоке

В первой области составляющие скорости нестабильны, происходит их формирование. В стабильной области профили скорости подобны по высоте аппарата. В области входа газового потока в приосевой зоне наблюдается снижение всех скоростей по величине, однако, зоны обратных токов, характерных закрученным потокам, не наблюдается. Завихритель оказывает демпфирующее действие на газодисперсный поток, происходит трансформация скоростей [3]. В ходе эксперимента подтверждена автомодельность газового потока при различных расходах газа и числах Рейнольдса $Re = (1,5 \div 6,0) \cdot 10^4$. Установлено, что профили скоростей не зависят от расхода жидкой и газовой фаз и определяются в основном степенью закрутки потока.

Исключение составляет область, расположенная в непосредственной близости к завихрителю, которая не оказывает существенного влияния на эффективность процесса газоочистки.

Выводы

Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе Ansys CFX.

Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата показали, что при увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями. Анализ полученных профилей скоростей позволяет выявить три характерные области по оси аппарата: область формирования газового потока, область стабильного потока и область демпфирования.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement No. 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023)

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Roshan, "Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine" J. Energy Resour. Technol. 142 (1), 20-27 (2020).
2. G. Bangga, "The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines," Adv. Theory Simul. 4, 200-204 (2021).
3. Y. Wang, "Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine" Renewable Energy 126, 801-818 (2018).

Зайтов Р.И., аспирант

(Казанский государственный энергетический университет)

Дадашева З.И., кандидат педагогических наук, доцент

(Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

Валеев С.И., кандидат технических наук, доцент

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ ГИДРОДИНАМИКА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЧИСТКИ ГАЗА

В статье рассмотрен новый перспективный аппарат ударно-инерционного действия с управляемой гидродинамикой, позволяющей оптимизировать процесс очистки газов с учетом характеристик улавливаемых компонентов. Предложена инерционная модель оценки эффективности осаждения пыли, учитывающая как характеристики улавливаемой пыли (размер и плотность частиц), так и режимные параметры, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопасти импеллеров. Расчеты предполагают линейную зависимость степени очистки от диаметра частиц в вероятностных логарифмических координатах.

Ключевые слова: ротоклон, ударно-инерционный, эффективность пылеулавливания, газовый поток, капли жидкости.

Zaitov R.I.

Dadasheva Z.I.

Valeev S.I.

INNOVATIVE TECHNOLOGY:

OPTIMIZED HYDRODYNAMICS TO IMPROVE GAS PURIFICATION

The article considers a new promising shock-inertial device with controlled hydrodynamics, which allows optimizing the gas purification process taking into account the characteristics of the captured components. An inertial model for evaluating the efficiency of dust deposition is proposed, taking into account both the characteristics of the captured dust (particle size and density) and operating parameters, the most important of which is the velocity of the gas flow passing through the impeller blades. Calculations assume a linear dependence of the degree of purification on the particle diameter in probabilistic logarithmic coordinates.

Keywords: rotoclone, shock-inertial, dust extraction efficiency, gas flow, liquid droplets.

Введение

Сравнительный анализ газоочистных аппаратов ударно-инерционного действия показывает, что известные аппараты весьма чувствительны к изменению газовой нагрузки на контактный канал и уровню жидкости, незначительные отклонения этих параметров от оптимальных значений приводят к раскачке уровней жидкости у контактных каналов, неустойчивому режиму работы и снижению эффективности пылеулавливания [1, 2]. Эти недостатки, а также слабая изученность протекающих процессов, отсутствие надежных методов расчета затрудняют разработку новых конструкций мокрых пылеуловителей такого типа и обуславливают актуальность работы [3-6].

Разработка конструкции ротоклона

Разработана и защищена патентом РФ конструкция ротоклона с регулируемыми синусоидальными лопастями [7].

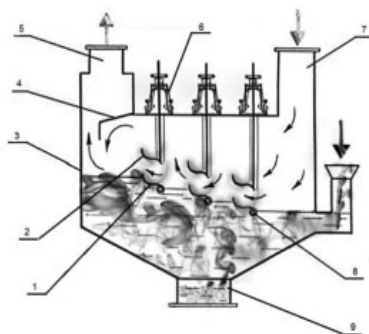


Рис. 1. Общий вид ротоклона

Подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате ее циркуляции внутри самого аппарата. Ротоклон, представленный на рис.1, характеризуется наличием трех щелевых каналов, образуемых верхними и нижними лопастями, причем в каждом последующем по ходу газа канале нижняя лопасть устанавливается выше предыдущей. Такое расположение способствует постепенному входу газожидкостного потока в щелевые каналы и снижает тем самым гидравлическое сопротивление устройства. Лопасты расположены на оси с возможностью их поворота, что позволяет создавать активную зону диффузии.

Оценка эффективности газоочистки

Количественную оценку эффективности захвата в аппаратах ударно-инерционного типа целесообразно проводить с помощью показателя удельного орошения $n = L_{\text{ж}}/L_{\text{г}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$ равного отношению объемов жидкой и газовой фаз в контактных каналах и характеризующего удельное орошение газа в каналах. На рис. 2. представлены расчетные значения среднего диаметра капель, образующихся при прохождении лопаток импеллера, от скорости газа в контактных каналах и удельного орошения газа.

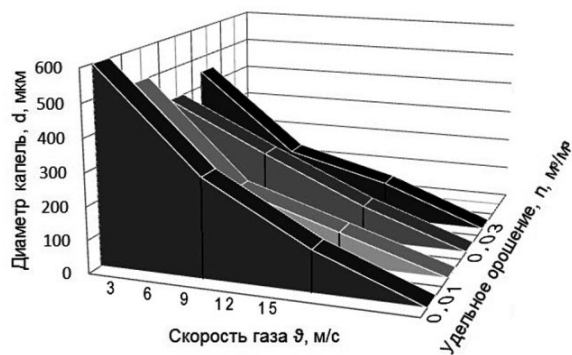


Рис. 2. Зависимость размера капель от скорости потока и удельного орошения n

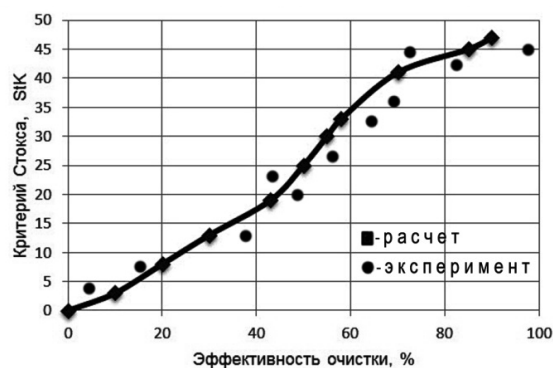


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки газа от критерия StK

Эффективность ударно-инерционного осаждения η_u является функцией следующего безразмерного критерия: $\eta_u = f\left(\frac{m_q \cdot g_q}{\xi_c \cdot d_0}\right)$. Для шарообразных частиц, движение которых подчиняется закону Стокса, этот критерий имеет следующий вид: $\frac{m_q \cdot g_q}{\xi_c \cdot d_0} = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_p^2 \cdot g_q \cdot \rho_q \cdot C_k}{\mu_c \cdot d_0}$. Комплекс $d_p^2 \cdot g_q \cdot \rho_q \cdot C_k / (18 \mu_c \cdot d_0)$ является параметром (числом) Стокса $\eta_u = f(Stk) = f\left(\frac{d_p^2 \cdot g_q \cdot \rho_q \cdot C_k}{18 \mu_c \cdot d_0}\right)$. На рис. 3 показана зависимость эффективности очистки газа от критерия StK (Стокса).

Выводы

Разработана новая конструкция ротоклона, позволяющая решить задачу эффективной сепарации пыли из газового потока. Подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате ее циркуляции внутри самого устройства. Теоретически полученные коэффициенты полезного действия подтверждают влияние характеристик пыли и рабочих параметров, таких как скорость газового потока и удельный расход жидкости, на эффективность ударно-инерционного осаждения. Полученные расчетные соотношения позволяют оценить вклад как характеристик улавливаемой пыли (размера и плотности частиц), так и режимных параметров, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопатки импеллеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков С.Г. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1994. –168 с.
2. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: АСВ, 1998. – 320 с.
3. Вальдберг А.Ю., Лебедюк Г.К. Мокрые пылеуловители ударного, центробежного и форсуночного действия. – М.:Цинтихимнефтемаш 1981. 38 с.
4. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – С-Пб: Химия, 1993. – 262 с.
5. Герцева М.И., Гордон Г.М. Каплеобразование и каплеунос в скруббере ударного действия. – Труды ГИН ЦветМета 1991, вып.44 С. 71–77.
6. Рычков В.П., Савельев Ю.А. Применение ротоклона «Урал» в промышленности Безопасность труда в промышленности 1982, №8, С. 43–45.
7. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1994. Vol. 3. P. 269–289.

Тюрина М.М., кандидат технических наук, доцент

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

Хуснутдинов А.Н., кандидат технических наук, доцент

(Казанский государственный энергетический университет)

Шуртуев М.М., ассистент

(Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА В ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЕ

В программном комплексе Ansys CFX проведено численное моделирование структуры течения потока в газопромывателе. Получены качественные картины распределения осевой, тангенциальной и радиальной компонент скорости в виде линий тока, проходящих вдоль сечения аппарата. В ходе эксперимента подтверждена автомодельность газового потока при различных расходах газа и числах Рейнольдса $Re = (1,5 \div 6,0) \cdot 10^4$. Установлено, что профили скоростей не зависят от расхода жидкой и газовой фаз и определяются степенью закрутки потока.

Ключевые слова: газопромыватель, Ansys CFX; моделирование, линии тока, движение частиц, тангенциальная скорость.

Tyurina M.M.

Khusnutdinov A.N.

Shurtuev M.M.

VISUAL MODELING OF THE FLOW STRUCTURE IN THE SCRUBBER

Numerical modeling of the flow structure in the gas scrubber was carried out using the Ansys CFX software package. Qualitative pictures of the distribution of the axial, tangential and radial velocity components in the form of streamlines passing along the cross section of the apparatus are obtained. During the experiment, the self-similarity of the gas flow was confirmed at various gas flow rates and Reynolds numbers $Re = (1,5 \div 6,0) \cdot 10^4$. It has been established that the velocity profiles do not depend on the flow rate of the liquid and gas phases and are determined by the degree of swirling of the flow.

Keywords: gas scrubber, Ansys CFX, modeling, current lines, particle motion, tangential speed.

Введение

Аналитический подход большинства исследователей к описанию гидродинамики инерционных аппаратов основывается на системе уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями неразрывности установившегося осесимметричного закрученного газодисперсного потока [1]. Решение системы уравнений Навье-Стокса математически затруднительно, что обуславливает необходимость применения пакетов программ для численного и визуального моделирования потоков, в частности программного комплекса Ansys.

Визуализация и анализ результатов расчета

Расчетные компоненты были заданы из базы данных Ansys CFX: воздух, чистая вода и дисперсная пыль. Было проведено численное моделирование структуры течения потока в газо-

промывателе [2]. Визуализировалась динамика изменения картины течения с сохранением координат всех узлов расчетной сетки и значений основных параметров течения в этих узлах. Были получены и интегральные параметры расчета, типичные для пылеуловителей: гидравлическое сопротивление, потребляемая мощность, эффективность очистки, закрутка потока [3]. В результате численного эксперимента были получены распределения тангенциальной скорости в продольном сечении рабочего пространства аппарата. Составляющая тангенциальной скорости u_θ существенно меняется по радиусу газопромывателя, что свидетельствует о наличии дифференциального вращения, в результате которого вихревые линии закручиваются по спирали. Для тангенциальной скорости характерен дрейф максимума от периферии к центру и сокращение зоны вынужденного вихря (рис. 1).

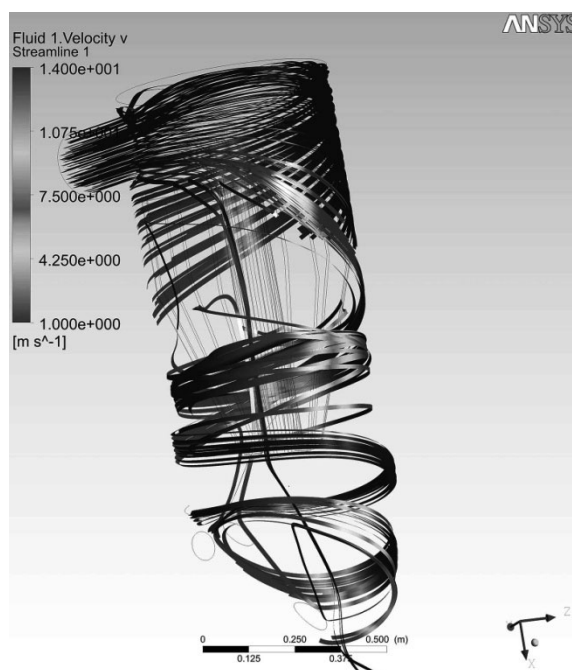


Рис. 1. Проекция тангенциальной скорости в потоке

Профиль тангенциальной скорости имеет форму параболы с максимумом, расположенным ближе к цилиндрической стенке, что можно объяснить действием центробежных сил. Значения скоростей потока в осевом направлении показывают, что центре потока она имеет фактически постоянное значение, а вблизи выхлопного патрубка образуется достаточно интенсивное течение в пристенном слое. Анализ полученных профилей скорости позволяет выявить три характерные области по оси аппарата: область формирования газового потока, область стабильного потока и область демпфирования. Практически во всех сечениях можно выделить две зоны: пристенную (зону свободного вихря) и приосевую (зону вынужденного вихря). Для тангенциальной скорости характерен дрейф максимума от периферии к центру и сокращение зоны вынужденного вихря. Тангенциальная скорость значительно больше осевой в пристенной и квазипотенциальной зонах, а в области оси практически одного с ней порядка. Осевая составляющая практически не меняет своего профиля, ее максимум находится вблизи стенки аппарата вихря (рис. 2).

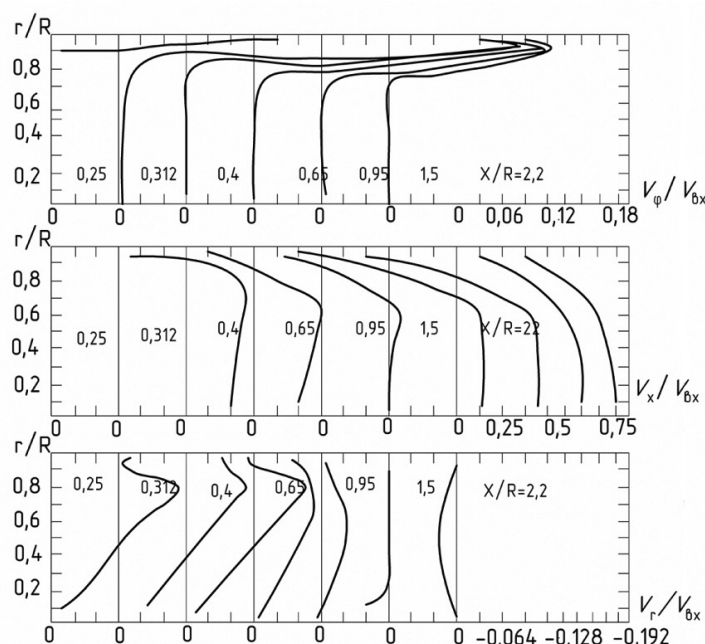


Рис. 2. Проекция тангенциальных, осевых и радиальных скоростей вдоль аппарата в сечениях $X/R = 0,25; 0,312; 0,4; 0,65; 0,95; 1,5; 2,2$ при значениях параметров:
 $V_{\varphi} / V_{ax} = 0,05; V_{\varphi} / V_{ax} = 1,8; Re = 2 \cdot 10^4$

В первой области составляющие скорости нестабильны, происходит их формирование. В стабильной области профили скорости подобны по высоте аппарата. В области входа газового потока в приосевой зоне наблюдается снижение всех скоростей по величине, однако, зоны обратных токов, характерных закрученным потокам, не наблюдается. Завихритель оказывает демпфирующее действие на газодисперсный поток, происходит трансформация скоростей [4]. В ходе эксперимента подтверждена автомодельность газового потока при различных расходах газа и числах Рейнольдса $Re = (1,5 \div 6,0) \cdot 10^4$. Установлено, что профили скоростей не зависят от расхода жидкой и газовой фаз и определяются в основном степенью закрутки потока [5].

Исключение составляет область, расположенная в непосредственной близости к завихрителю, которая не оказывает существенного влияния на эффективность процесса газоочистки.

Выводы

Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе Ansys CFX. Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата показали, что при увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями. Анализ полученных профилей скоростей позволяет выявить три характерные области по оси аппарата: область формирования газового потока, область стабильного потока и область демпфирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Roshan, "Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine" J. Energy Resour. Technol. 142 (1), 20–27 (2020).
2. M. Asadi Energy Convers. Manage. 238, 114–119 (2021).
3. Y. Kyojuka, J. Fluid Sci. Technol. 3, 439–449 (2008).
4. G. Bangga, "The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines," Adv. Theory Simul. 4, 200–204 (2021).

5. *Y. Wang*, “Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine” *Renewable Energy* 126, 801–818 (2018).

Успажиев Р.Т., кандидат физико-математических наук, доцент

(Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова)

Харченко С.Б., старший преподаватель (Казанский государственный энергетический университет)

Валеев С.И., кандидат технических наук, доцент

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В БАРБОТАЖНО-ВИХРЕВОМ АППАРАТЕ

Рассмотрены закономерности движения газо-жидкостного потока. Установлено, что движение пленки жидкости имеет ярко выраженный волновой характер. При этом длина и амплитуда волны учитываются критерием Рейнольдса для газа и жидкости. Предложен метод расчета гидравлического сопротивления при движении потоков, который позволяет выразить значение коэффициента сопротивления в зависимости только от критерия Рейнольдса для данной системы.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, критерий Рейнольдса, газ, жидкость, амплитуда волны, длина волны.

Uspazhiev R.T.

Kharchenko S.B.

Valeev S.I.

ANALYSIS OF THE REGULARITIES OF HYDRAULIC RESISTANCE IN A BUBBLING VORTEX APPARATUS

The laws governing the movement of a gas-liquid flow are considered. It is established that the motion of the liquid film has a pronounced wave character. In this case, the length and amplitude of the wave are taken into account by the Reynolds criterion for gas and liquid. A method is proposed for calculating the hydraulic resistance during the movement of flows, which allows expressing the value of the drag coefficient depending only on the Reynolds criterion for a given system.

Keywords: hydraulic resistance, Reynolds criterion, gas, a liquid, amplitude of a wave, length of a wave.

Введение

В последнее время повышение эффективности очистки в основном достигается благодаря применению высокоскоростных аппаратов и многоступенчатых схем, а также использованию дополнительных механизмов сепарации и физико-химических методов обработки газов. Применение высокоскоростных аппаратов связано с разработкой и осуществлением высокоинтенсивных процессов межфазного взаимодействия в турбулентных газодисперсных потоках [1]. Целью данной работы является поиск более удобного и точного метода расчета гидравлического сопротивления при восходящем течении потоков.

Были обработаны экспериментальные данные, имеющиеся в литературе [2]. Во всех этих трудах использована система воздух – вода, скорость газа менялась от 10 до 35 м/сек, а плотность

орошения от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $2,8 \cdot 10^{-3}$ м²/сек. Эксперименты проводились на барботажно вихревом аппарате с диаметром цилиндрической камеры 100 – 350 мм [3]. На рис. 1 показана зависимость ξ от Re_r при постоянном $Re_{ж}$ для камер различного диаметра.

Многоступенчатые вихревые аппараты (ВА) с общим противоточным движением взаимодействующих потоков по конструкции аналогичны колоннам барботажного типа, но имеют и некоторые отличия, обуславливающие их преимущества [1]. Во-первых, на тарелках фиксируются контактные устройства (КУ) прямоточного взаимодействия фаз. Газ с высокой скоростью входит в КУ, захватывает жидкость, поступающую через специальные каналы, и образует с ней совместное однонаправленное движение. На выходе из контактного устройства поток газа разделяется с жидкостью.

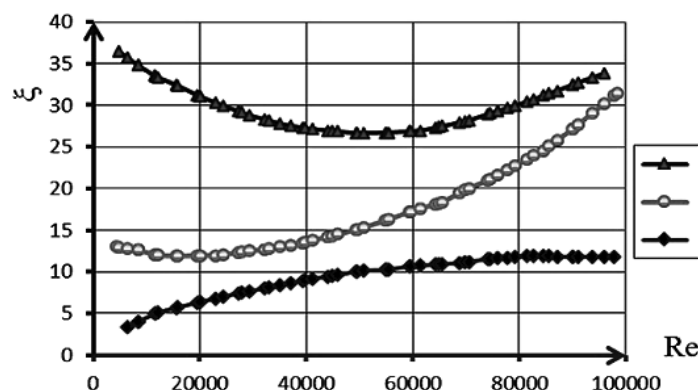
При условии прямоточного взаимодействия потоков, жидкость из области контакта выводится на большой скорости. Испытания показали, что наиболее эффективное отделение жидкости от газа достигается в поле центробежных сил. Во-вторых, вихревые аппараты характеризуются наличием вихревого, поступательно-вращательного движения в КУ. Значительная скорость легкой фазы, захватывающей жидкость в прямоточное движение, а также эффективная сепарация фаз при взаимодействии в вихревом потоке, позволяют в 5-8 раз усилить массоперенос и повысить пропускную способность аппарата.

В аппаратах с нисходящим прямотоком жидкость и пар (газ) в зоне контакта движутся сверху вниз, поэтому они могут работать в очень широком интервале нагрузок по жидкости и газу. Но в этом случае для сохранения общего противотока в аппарате требуются дополнительные каналы для подвода газа (пара) на вышележащие ступени. Поэтому такие аппараты рекомендуются для процессов с большим удельным расходом жидкости, а также для процессов газоочистки с одной ступенью контакта [2].

В аппаратах с перекрестным прямотоком происходит локальное однонаправленное движение потоков, как правило, с последующей центробежно-гравитационной сепарацией. Предельная скорость легкой фазы в аппаратах этого типа составляет от 6 до 10 м/с. Такие аппараты целесообразно использовать, например, в процессах со значительными тепловыми эффектами [2,3]. Наиболее высокой производительностью обладают ВА с восходящим прямотоком.

В зоне контакта таких аппаратов скорость легкой фазы составляет при средних давлениях от 15 до 40 м/с. Они широко применяются в промышленности и являются наиболее перспективными.

Исследования показывают [4], что профили скоростей газового потока для геометрически подобных завихрителей автомодельны по диаметру контактного устройства и расходу газа. В установившемся потоке выделяют приосевую зону квазитвердого вращения и периферийную зону потенциального вращения с соответствующими приближенными профилями.



Диаметр камеры (в мм): Δ -100 ($Re_{ж} = 80$); $\square$ -250 ($Re_{ж} = 65$); $\circ$ -350 ($Re_{ж} = 105$)

Рис. 1. Зависимость между коэффициентом гидравлического сопротивления ξ и Re_r при различных диаметрах камеры и ($Re_{ж}$)

Из рис. 1 следует, что для каждого диаметра камеры имеются два участка: на первом участке кривая имеет слегка вогнутую форму, и ξ резко уменьшается с увеличением Re_r , на втором участке кривая ξ мало зависит от изменения Re_r . При увеличении скорости газа, ξ понижается до некоторого минимума, а затем постепенно возрастает и после определенного участка приобретает прямую зависимость от скорости газа, аналогичную сухому аппарату. Описанное явление можно качественно объяснить тем, что гидравлическое сопротивление в камерах с орошаемыми стенками в условиях прямотока сильно зависит от действительной скорости газа, которая тесно связана со скоростью газа по полному сечению и толщиной пленки. Установлено, что коэффициент ξ повышается с увеличением критерия Рейнольдса для жидкости $Re_{ж}$ и пропорционален ему в степени 0,31 [4]. Кроме того, он зависит от длины волны, которая учитывается критериями Рейнольдса для газа и жидкости, что позволяет выразить значение ξ в зависимости только от этого критерия для данной системы.

$$\zeta = f(Re_r, \leftrightarrow \leftrightarrow Re_{ж})$$

где $Re_r = \omega \cdot d/\nu$ – критерий Рейнольдса для газа; $Re_{ж} = 4 \cdot Q/\nu$ – критерий Рейнольдса для жидкости.

Предложенная полуэмпирическая формула выражает закон сопротивления для течения двухфазной системы в условиях восходящего прямотока, она применима при плотностях орошения до $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Залогин Н.Г., Шухер С.М. Очистка дымовых газов. 2004. – 220 с.
2. Сугак, Е. В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань, 1999. – 224 с.
3. Рычков В.П., Савельев Ю.А. Применение ротоклона «Урал» в промышленности Безопасность труда в промышленности 1982, №8, С. 43–45.
4. Launder B. E., Spalding D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1994. Vol. 3. P. 269–289.

Компьютерные науки и информатика

Искусственный интеллект и машинное обучение

Максимов А.И., кандидат технических наук, научный сотрудник

Молодов В.А., зав. лабораторией

Перминов А.Ю., кандидат экономических наук, руководитель информационно-аналитического центра

Фоменко Н.С., кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник

Самарин А.Р., научный сотрудник

*Маруев А.Д., инженер-программист
(Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы)*

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ И ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕДИЦИНСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

В работе рассмотрены вопросы интеграции нейросетевых моделей машинного обучения с онтологическими моделями предметной области в контексте задач автоматической обработки текстов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, дистрибутивная семантика, векторные модели представления текстов, компьютерные онтологии.

Maksimov A.I.

Molodov V.A.

Perminov A. Yu.

Fomenko N.S.

Samarin A.P.

Maruev A.D.

NEURAL NETWORK AND ONTOLOGICAL MODELS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE TASKS OF AUTOMATIC PROCESSING OF MEDICAL DOCUMENTATION

The work deals with the integration of neural network models for machine learning with ontological models of the subject domain in the context of natural language processing tasks.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, distributional semantics, vector models of text representation, computer ontologies.

Формирование элементов системы организационного развития лечебно-диагностических процессов медицинской организации часто предполагает анализ значительного объема текстовой информации. Эффективность обработки подобных информационных потоков существенно зависит от используемых при этом методов. В числе наиболее развитых и перспективных методов обработки электронных документов в первую очередь следует указать методы искусственного

интеллекта (ИИ) в рамках одного из наиболее актуальных современных направлений технологий ИИ – обработке естественного языка (*Neural Language Processing, NLP*).

В современных подходах к решению NLP-задач используется широкий спектр моделей и алгоритмов машинного обучения, базирующихся на методах математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики. Основой применения методов машинного обучения в NLP-проблематике являются векторные представления текстов, построение которых решается в рамках парадигмы дистрибутивной семантики, где моделями слов, предложений и документов являются их векторные представления. Одной из простейших векторных моделей является *one-hot-векторизация*.

One-hot-вектор – это вектор размерности словаря, у которого все значения равны нулю, кроме позиции, соответствующей кодируемому слову, которой приписывается значение единицы. Подобное векторное представление, как правило, напрямую не используется и служит базовым формализмом для построения более сложных векторных моделей.

В основе формирования более семантически-емких векторных представлений лежит дистрибутивная гипотеза, постулирующая, что слова имеют похожий смысл, если они используются в похожих контекстах. Среди моделей, основой которых является дистрибутивная гипотеза, выделяются два класса векторных представлений – тематическое моделирование и модели погружения слов.

Основные идеи, положенные в основу алгоритмов тематического моделирования, заключаются в следующем:

- В корпусе из m документов выбирается k тем, которые предполагается обнаружить в этом корпусе.
- Тематическая модель корпуса представляет собой векторизованное множество документов, каждый из которых представлен в виде комбинации имеющихся в нем тем.
- Алгоритмы тематического моделирования позволяют определить взвешенные связи между документами и темами, а также между темами и словами.

В терминах матричного анализа, суть данного подхода к векторизации текстов заключается в аппроксимации очень большой матрицы «Документы–Слова» матрицами меньшей размерности – «Слова–Темы» и «Темы–Документы». В числе наиболее известных моделей и алгоритмов данного класса можно указать латентно-семантический анализ (*Probabilistic Latent Semantic Analysis, pLSA*), неотрицательную матричную факторизацию (*Nonnegative Matrix Factorization, NMF*) и латентное распределение Дирихле (*Latent Dirichlet allocation, LDA*) [1, 2].

Другим классом моделей векторизации являются модели погружения слов. В моделях данного класса векторные представления слов образуют некое семантическое пространство, в котором геометрическое расположение точек, соответствующих векторным представлениям слов, отражает их семантическое сходство или различие, что для наиболее удачно построенных векторных представлений дает возможность реализации некоей «семантической арифметики». Так, из векторного представления слова ПАРИЖ можно вычесть векторное представление слова ФРАНЦИЯ и прибавить векторное представление слова ГЕРМАНИЯ. Результатом такой «семантической арифметики» будет вектор, наиболее близкий к векторному представлению слова БЕРЛИН. В качестве меры для сопоставления семантических векторных представлений обычно используется *косинусное расстояние*, отражающее степень сходства или различия сравниваемых векторов. В числе моделей данного класса следует отметить *Word2Vec, Doc2Vec, FastText, GloVe* [3, 4].

Современные ИИ-технологии, использующие рассмотренные методы векторизации, позволяют достаточно успешно решать ряд актуальных NLP-задач, в числе которых задачи кластеризации и классификации текстов, извлечение именованных сущностей, аспектов и семантических отношений, определения тематики, реферирования (суммаризации) текстов, задачи машинного

перевода, анализа тональности, и ряд других прикладных задач. В то же время следует отметить, что в существующих решениях в сфере автоматической обработки текстов есть ряд узких мест, требующих проведения дальнейших исследований и разработок.

Рассмотрим одну из подобных проблем, особенно актуальную в части расширения возможностей построения векторных представлений текстов, являющихся основой решения подавляющего большинства NLP-задач. Современные NLP-модели, в основе которых лежит обширный спектр нейросетевых архитектур, обладают богатыми возможностями аккумуляции семантики предметных областей (ПО), для которых разрабатываются соответствующие ИИ-решения. Однако в части аккумуляции логики ПО возможности данных моделей существенно более скромные. Учитывая, что когнитивная емкость векторных представлений является важнейшим фактором успешности решения большинства NLP-задач, особую актуальность приобретают задачи обогащения моделей машинного обучения экспертными знаниями особенностей организации соответствующих ПО (знаниями логики ПО). В качестве одного из подходов к данной проблеме целесообразно рассмотреть возможности построения композиционных ИИ-решений в контексте интеграции нейросетевых моделей машинного обучения с онтологическими моделями ПО, основанными на использовании дескрипционных логик и графов знаний.

Суть подобного решения заключается в следующем. Прежде всего, необходимо сформировать достаточно обширный корпус текстов, описывающих рассматриваемую ПО как сложную систему, состоящую из множества компонентов – субъектов, объектов и процессов, находящихся между собой в определенных взаимосвязях. Далее, для формализации сформированных описаний, основываясь на собранном корпусе текстов, необходимо построить компьютерную онтологию ПО, представляющую собой словарь основных терминов (понятий) этой области и множество логических связей и отношений, показывающих, как эти термины соотносятся между собой. Разработка такой онтологии предполагает использование определенного формализма, заключающегося в представлении знаний в некоторой знаковой системе, более простой, чем естественный язык. Доминирующими среди формализмов построения онтологических моделей в настоящее время являются *дескрипционные логики*, основой которых являются те или иные подмножества *логики первого порядка* [5, 6].

Дескрипционные логики (ДЛ) представляют собой семейство логических формализмов, описывающих предметную область в терминах концептов (*классов, понятий*), ролей (*отношений*) и индивидов и позволяющих определять сложные понятия как комбинацию простых. Данные логики характеризуются наличием формальной семантики, являются достаточно выразительными и, что особенно важно, разрешимыми, что позволяет использовать для обработки знаний средства логического вывода – когнитивные процессоры. На основании выражений, записанных в построенных на данном формализме онтологиях, логические процессоры могут выводить знания, в явном виде в онтологии не заданные [6].

Другим полезным формализмом для моделирования логических взаимосвязей рассматриваемой ПО являются графы знаний. В общем виде графовая модель знаний представляется множеством вершин (узлов), соединенных ребрами. В строгом определении графом G называется пара множеств V, E

$$G = (V, E),$$

где V – множество вершин, являющееся подмножеством любого счетного множества, E – множество ребер, являющееся подмножеством декартова произведения $V \times V$.

В реализации графовых моделей выделяются два основных подхода – *RDF (Resource Description Framework)* и *LPG (Labeled Property Graph)*. Первый из указанных подходов предполагает представление графа в виде семантического *RDF-графа*, состоящего из множества триплетов вида Субъект-Предикат-Объект. В данном подходе представления знаний делается акцент

на работу с предикатами *RDF-графа*, базовым языком запросов является *SPARQL* – язык запросов к *RDF-триплетам*. *LPG*-подход более ориентирован на различные варианты классических графов (направленных, взвешенных, гиперграфов и т. д.) [7].

Итоговая конструкция онтологической модели ПО (базы знаний) будет включать систематизированный корпус текстов, описывающих основные структурно-функциональные особенности (ПО), компьютерную онтологию, отражающую основные взаимосвязи между компонентами ПО в терминах дескрипционной логики, и графовую модель ПО, расширяющую ДЛ-представления множеством дополнительных взаимосвязей и обеспечивающую богатые возможности когнитивной навигации. Подобная организация базы знаний позволяет отразить все наиболее важные когнитивные характеристики рассматриваемой ПО. Для медицинского учреждения это будут основные особенности его организации и функционирования, состав и структура подразделений, процессно-функциональные схемы, взаимосвязи между компонентами системы.

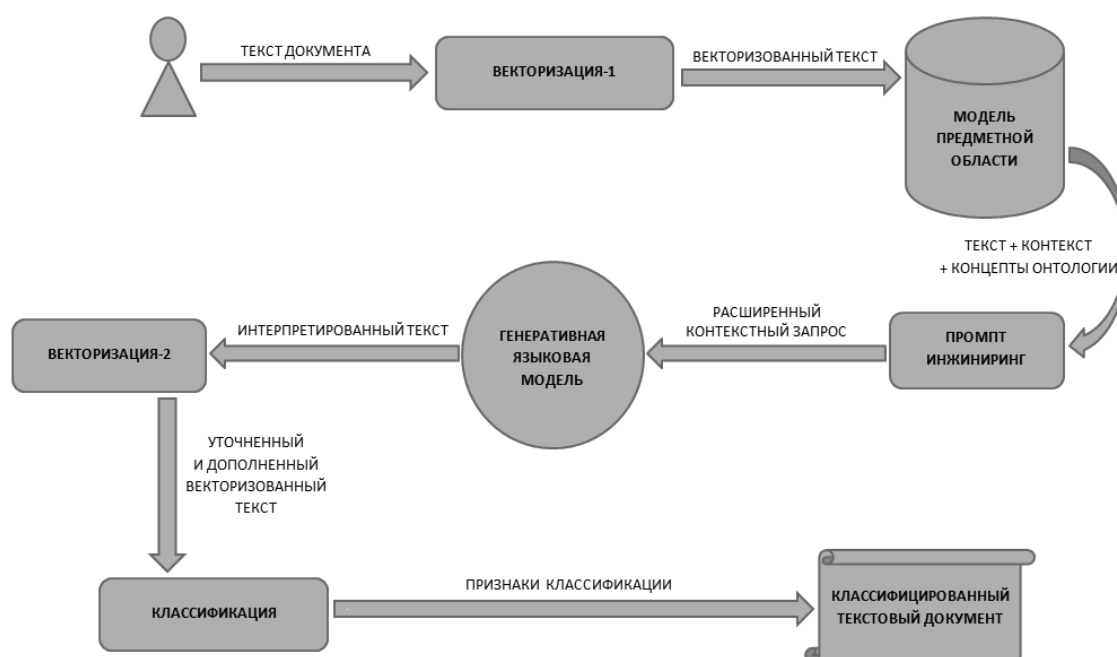


Рис. 1. Общая схема задачи автоматической классификации документов.

Общая схема автоматической обработки документов в контексте рассмотренных положений для одной из наиболее актуальных NLP-задач – задачи классификации – представлена на рис.1.

Согласно данной схеме, процесс автоматической обработки документов включает следующие основные этапы:

- первичная векторизация текстового документа;
- поиск актуального контекста в векторной базе знаний (модели ПО);
- поиск актуальных концептов и взаимосвязей между ними в ДЛ-онтологии и графе знаний;
- формирование контекстно-расширенного запроса и его передача на вход генеративной языковой модели;
- генерация ПО-интерпретированного текста и его передача в модуль вторичной векторизации;
- формирование векторного представления когнитивно-обогащенного текста и его передача модулю классификации;

- цикл итераций бинарной классификации и определение актуальных классификационных признаков.

Подобный подход к интеграции нейросетевых и онтологических моделей искусственного интеллекта позволяет реализовать формирование семантически-емких векторных представлений электронных документов медицинской организации. Сфера практических применений данного подхода охватывает задачи автоматизации обработки текстовых документов; повышения качества документирования лечебно-диагностических процессов; создания интеллектуальных виртуальных ассистентов-консультантов по спектру услуг медицинской организации; задачи поддержки информационно-сложных организационных решений по текущей деятельности медицинской организации и ее развитию.

Внедрение рассмотренных решений в практику медицинских стационаров позволит повысить эффективность функционирования данных организаций за счет качественно новых возможностей в сфере поддержки принятия сложных организационных решений, разработки новых когнитивных сервисов и сокращения трудозатрат на выполнение множества трудоемких процедур, связанных с обработкой электронных документов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов А.И., Молодов В.А., Перминов А.Ю., Фоменко Н.С., Самарин А.Р., Маруев А.Д., Пархоменко М.В., Пронина А.И. Методы машинного обучения в задачах автоматической обработки медицинских текстов. // *Естественные и технические науки*, № 3, 2024. – С. 29–33.
2. Liu Y., Liu Z., Chua T.-S., Sun M. Topical word embeddings // *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – AAAI'15. – AAAI Press, 2015. – Pp. 2418–2424.
3. Mikolov T. Distributed representations of words and phrases and their compositionality. / T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. Corrado, J. Dean, // *Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Lake Tahoe, Nevada. – 2013. – P. 3111–3119.
4. Pennington J. Glove: Global vectors for word representation /J. Pennington, R. Socher, C. Manning // *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*. – 2014. – С. 1532–1543.
5. Konev B., Lutz C., Ozaki A., Wolter F. “Exact Learning of Lightweight Description Logic Ontologies», *Journal of Machine Learning Research*, vol. 18, no. 201, pp. 1–63, 2018
6. Максимов А. И., Молодов В. А., Пархоменко М. В., Пронина А. И. Онтологические модели в управлении знаниями информационно-сложной предметной области. // *Естественные и технические науки*, № 3, 2022. – С. 156–158.
7. Максимов А.И., Молодов В.А., Рунов С.С., Сабогаль-Тиного Л. Э. Графовые модели компьютерных онтологий медицинских информационных систем. // *Естественные и технические науки*, № 9, 2021. – С. 113–115.

Физические науки

Физика конденсированного состояния

Калимуллин Р.И., доктор физико-математических наук, доцент

(Казанский государственный энергетический университет)

Алихаджиев С.Х., кандидат физико-математических наук, доцент

(Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

Абубакаров А.Г., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель

(Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика)

ВЛИЯНИЕ НЕСТЕХИОМЕТРИИ СОСТАВА НА ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА BiFeO_3

Установлено влияние нестехиометрии на структуру и диссипативные свойства керамики феррита висмута состава Bi_xFeO_3 . Показаны отличия в механизмах образования примесных фаз в катиондефицитных и катионизбыточных средах. Установлено наибольшее СВЧ – поглощение керамики с наибольшим количеством балластных соединений.

Ключевые слова: диссипативные свойства, нестехиометрия, феррит висмута.

Kalimullin R.I.

Alikhajiev S.Kh.

Abubakarov A.G.

EFFECT OF NONSTOICHIOMETRY OF THE COMPOSITION ON THE DISSIPATIVE PROPERTIES OF BiFeO_3

The effect of nonstoichiometry on the structure and dissipative properties of Bi_xFeO_3 bismuth ferrite ceramics has been established. Differences in the mechanisms of formation of impurity phases in cation-deficient and cation-excess media are shown. The greatest microwave absorption of ceramics with the largest number of ballast compounds was found.

Keywords: dissipative properties, nonstoichiometry, bismuth ferrite.

Введение

Феррит висмута, BiFeO_3 , является удобным объектом для создания магнитоэлектрических материалов благодаря высоким значениям температур сегнетоэлектрического (СЭ) ($T_c \sim 1083 \text{ K}$) и магнитного ($T_N \sim 643 \text{ K}$) упорядочений [1].

Однако, широкому практическому использованию материалов на его основе препятствует низкий уровень магнитоэлектрических взаимодействий, обусловленный, с одной стороны, особенностями магнитной и кристаллической структур, а, с другой, - большой разницей между температурами антиферромагнитного и СЭ фазовых переходов (ФП). Кроме того, термодинамическая [2] и кинетическая [3] неустойчивости феррита висмута, определяющие возникновение «сопутствующих» примесей (Bi_2O_3 , $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, $\text{Bi}_{36}\text{Fe}_2\text{O}_{57}$), приводят к высокой электропроводности и диэлектрической нестабильности керамических материалов. Для устранения указанных негативных явлений ранее использовали замещение висмута в А-подрешётке структуры перовскита редкоземельными элементами, а также различные методы активации исходных компонентов.

Объектами настоящего исследования стали керамики с общей формулой Bi_xFeO_3 ($x=0,80\div 1,20$). Все образцы получены твердофазным методом из оксидов Bi_2O_3 и Fe_2O_3 квалификации «ч.д.а.» с последующим спеканием по обычной керамической технологии. Температуры синтеза выбирали из интервала $T_{1,2} = (750\div 850)^\circ\text{C}$, времена выдержек $\tau_1 = 10$ ч., $\tau_2 = (2\div 5)$ ч; температуры и времена выдержек при спекании – из интервала $T_{\text{сп.}} = (800\div 950)^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{сп.}} = (1\div 2)$ ч. Рентгенографические исследования проводили методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН 3 (схема фокусировки по Брэггу-Брентано) с использованием – излучения. Для экспериментального исследования диссипативных свойств изготовленных материалов в диапазоне частот ($1.0\div 9.0$) ГГц использовали установку на основе анализатора цепей E8363B 10 Hz – 40 GHz Series PNA Network Analyzes Agilent Technologies (США), подробное описание которой представлено в [4].

На (рис. 1) приведены зависимости Δ углового параметра, α , экспериментального и теоретического объемов ячейки, а также относительных интенсивностей сильных линий примесных фаз $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ и $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ от x . Видно, что с ростом x I/I_1 $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ увеличивается, особенно резко при $x > 0.97$, а I/I_1 $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ уменьшается до 0 при $x = 1.04$. Обе зависимости имеют минимум при $x = 0.97$ ($I/I_1=4$), в то время как относительная интенсивность сильных линий этих фаз предположительно должна быть ~ 10 (на пересечении пунктирных прямых). Неожиданным является, во-первых, то, что при $x=1.04$ резко уменьшается количество примеси с большим содержанием Bi, во-вторых, то, что объем ячейки, $V_{\text{эксп}}$, не изменяется в соответствии с зависимостью $V_{\text{теор}}(x)$. Некоторое уменьшение $V_{\text{эксп}}$ с ростом x , более медленное, чем $V_{\text{теор}}$, наблюдается лишь в интервале $0.88 \leq x \leq 0.92$, а в интервале $0.92 \leq x \leq 1.04$ остается практически постоянным, за исключением минимума при $x=1.02$. Важно отметить также тот факт, что $V_{\text{эксп}}$ значительно превосходит $V_{\text{теор}}$, который рассчитывается для идеальной, лишенной каких-либо дефектов, структуры. Таким образом, выделяются 4 значения x , при которых наблюдаются некоторые особенности в поведении изучаемых характеристик – 0.92, 0.97, 1.02, 1.04.

Изменение $\rho_{\text{эксп}}$ и $\rho_{\text{отн эксп}}$ с ростом x имеет периодический характер. Казалось бы, по мере увеличения x от 0.88 до 1.0 дефектность структуры BiFeO_3 должна уменьшаться и $\rho_{\text{отн теор}}$ должна расти, однако она падает вплоть до $x=1.02$, после чего намечается её незначительный рост. Таким образом, после спекания выделяются точки $x=0.92$, 0.97, 1.02.

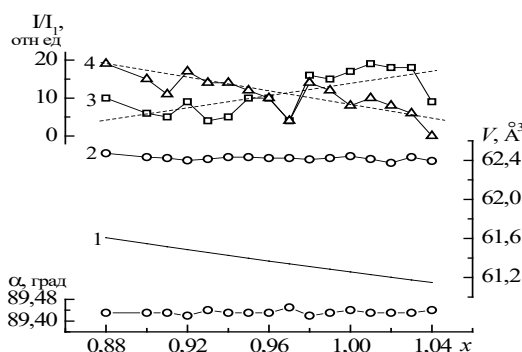


Рис. 1. Зависимости теоретического (1), экспериментального (2) объемов ячейки, Bi_xFeO_3 , относительных интенсивностей сильных линий $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ (3), $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ (4) от x после первого синтеза при $T_1=790^\circ\text{C}$, 10 ч.

На (рис. 2) показаны спектры поглощения СВЧ – мощности в керамиках ТР состава Bi_xFeO_3 .

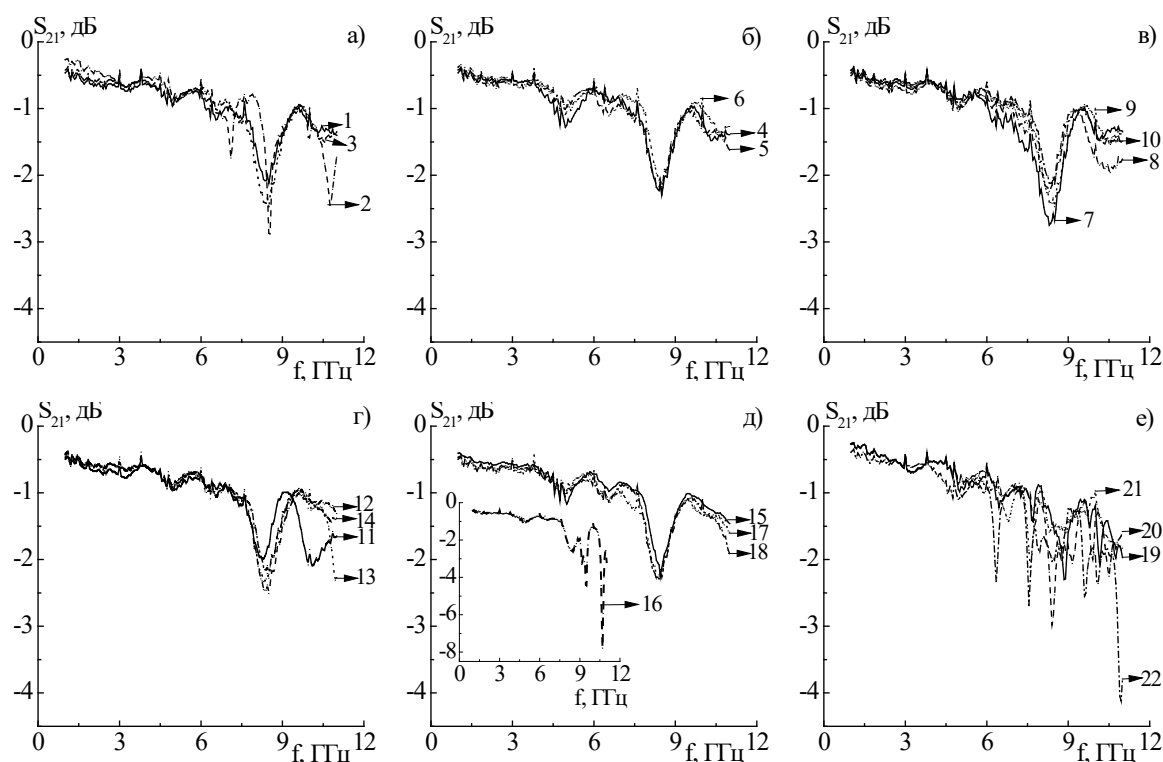


Рис. 2. Спектры поглощения СВЧ – мощности в керамиках твердых растворов состава Bi_xFeO_3 (а–з). Цифры на графиках – значения x .

Видно, что, как и можно было предположить а priori, максимальное СВЧ – поглощение свойственно наиболее примесным объектам, то есть, ферриту висмута с максимальной нестехиометрией.

Установлено влияние нестехиометрии на структуру и диссипативные свойства (СВЧ – поглощение) керамики феррита висмута состава Bi_xFeO_3 ($0.80 \leq x \leq 1.20$).

Показаны отличия в механизмах образования примесных фаз в катиондефицитных и катионизбыточных средах.

Установлено наибольшее СВЧ – поглощение керамики с наибольшим количеством балластных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смоленский Г.А. Сегнетомагнетики Г.А Смоленский, И.Е. Чупис // УФН. – 1982. – С. 137, С. 415.
2. Абубакаров А.Г., Павелко А.А., Шилкина Л.А. [и др.] Радиопоглощающие свойства в 4-х компонентной системе $0.98(x\text{PbTiO}_3 - y\text{PbZrO}_3 - z\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3) - 0.02\text{PbGeO}_3$ // Физика бес-свинцовых пьезоактивных и родственных материалов (Анализ современного состояния и перспективы развития): Труды Четвёртого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума: В 2-х томах, Ростов-на-Дону – Туапсе, 02–06 сентября 2015 года / Редакционная коллегия: Резниченко Л.А., Вербенко И.А., Павленко А.А., Андрюшина И.Н.. Том 1. – Ростов-на-Дону – Туапсе: Южный федеральный университет, 2015. – С. 39-43.

3. *Абубакаров А.Г., Резниченко Л.А., Мануилов М.Б. [и др.] Особенности СВЧ-поглощения электромагнитного излучения сегнетоэлектрическими ниобиевыми сложными оксидами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 10-3. – С. 88–90.*
4. *Sadykov K.A., Verbenko I.A., Reznichenko L.A. [et al.] Phase pattern of barium strontium titanate system and dielectric responses of its solid solutions // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 59, No. 12. – P. 2162–2167.*

Биологические науки

Физиология человека и животных

Игенов М.Д., преподаватель

Новик Я.В., кандидат ветеринарных наук, доцент, и.о. зав. кафедрой, директор института ветеринарной медицины и биотехнологии

Ухлова А.В., старший преподаватель

Мотин А.Г., аспирант

(Новосибирский государственный аграрный университет)

УДК 619 [615.331 : 616.15]: 598.271

ВЛИЯНИЕ ВИТАМИННО-МИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПРОБИОТИКОМ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРОВИ ВОЛНИСТЫХ ПОПУГАЙЧИКОВ

Изучено влияние витаминно-минерального комплекса с пробиотиком на физиологический статус и морфологические показатели крови волнистых попугаев. Витаминно-минеральный комплекс с пробиотиком вводили в состав полноценных гранул и дозировали в соответствии с физиологическими потребностями птицы и энергетической емкостью кормовой единицы. Птицам 1-й группы назначали комплекс в дозировке 1 мг/100 г живой массы, 2-й группы – 3 мг/100 г, 3-й группы – 5 мг/100 г 1 раз в сутки в течение 45 дней. Волнистым попугаям группы контроля давали гранулы без пробиотического комплекса. В результате исследования установлено, что при его использовании в качестве постоянного корма, наблюдаются количественные изменения уровня лейкоцитов, содержания эритроцитов, средний уровень гемоглобина, тромбоцитов и варианты значений колеблются в пределах допустимой нормы.

Ключевые слова: пробиотик, гранулы, волнистый попугайчик, гематология, кровь, лейкоциты, эритроциты, гемоглобин, тромбоциты.

Igenov M.D.

Novik Ya.V.

Ukhlova A.V.

Motin A.G.

INFLUENCE OF VITAMIN-MINERAL COMPLEX WITH PROBIOTIC ON MORPHOLOGICAL INDICATORS OF BLOOD OF BUDGERIGARS

The effect of a vitamin-mineral complex with a probiotic on the physiological status and morphological parameters of the blood of budgerigars was studied. A vitamin-mineral complex with a probiotic was introduced into the composition of complete granules and dosed in accordance with the physiological needs of the bird and the energy capacity of the feed unit. Birds of the 1st group were prescribed the complex at a dosage of 1 mg/100 g of live weight, the 2nd group – 3 mg/100 g, the 3rd group – 5 mg/100 g once a day for 45 days. Budgerigars in the control group were given pellets without the probiotic complex. As a result of the study, it was established that when it is used as a constant feed, quantitative changes in the level of leukocytes, erythrocyte content are observed, the average level of hemoglobin, platelets and variant values fluctuate within the permissible norm.

Keywords: probiotic, granules, budgie, hematology, blood, leukocytes, erythrocytes, hemoglobin, platelets.

Введение

В современных условиях жизни здоровье декоративных животных и птиц является чрезвычайно важным моментом в жизни многих владельцев. Поэтому актуальной задачей является разработка полнорационного комплекса, способного поддерживать физиологическое состояние волнистых попугаев, которые сейчас являются популярными домашними питомцами у многих владельцев. В связи с этим на базе ФГБОУ ВО Новосибирского ГАУ, Института ветеринарной медицины и биотехнологии, лаборатории кафедры фармакологии и общей патологии был разработан витаминно-минеральный комплекс с пробиотиком в виде полноценных гранул [1, 2, 3]. В результате деятельности пробиотика увеличивается количество *Bacillus subtilis* в организме попугаев, в частности в тонком кишечнике [4, 5]. Созданный витаминно-минеральный комплекс с пробиотиком оказывает следующие основные виды действия: антимикробное, антибактериальное и противовирусное действие. Цель исследования – оценить влияние полнорационного витаминно-минерального комплекса с *Bacillus subtilis* на морфологические составляющие крови и физиологический статус волнистых попугаев.

Материалы и методы исследования

На базе кафедры фармакологии и общей патологии, Института ветеринарной медицины и биотехнологии, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ в 2023 году был проведен опыт. Объектом исследования были волнистые попугаи в возрасте от 60 до 180 дней. Предмет исследования – полнорационный витаминно-минеральный комплекс с пробиотиком. Соблюдая принцип пар-аналогов, из клинически здоровых волнистых попугаев сформировали группы с примерным соотношением самцов и самок 50 на 50 (табл. 1).

Попугаи опытной и контрольной групп содержались в одинаковых стандартных условиях, соответствующих зоогигиеническим нормам. При кормлении мы использовали рацион в виде гранул собственного производства.

Таблица 1

Структура эксперимента

Группа	1-ая группа (опыт)	2-ая группа (опыт)	3-я группа (опыт)	Контрольная группа
Количество особей	n = 20	n = 20	n = 20	n = 20
Комплекс	витаминно- минеральный комплекс с <i>Bacillus subtilis</i>	витаминно- минеральный комплекс с <i>Bacillus subtilis</i>	витаминно- минеральный комплекс с <i>Bacillus subtilis</i>	-
Периодичность	1 раз в сутки	1 раз в сутки	1 раз в сутки	-
Дозировка	1 мг/100 гр	3 мг/100 гр	5 мг/100 гр	-
Продолжительность эксперимента, сут.	45			-

Гематологические показатели крови птиц исследовали в учебно-научной лаборатории ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, Института ветеринарной медицины и биотехнологии, кафедры фармакологии и общей патологии. Использовали закрытый автоматический гематологический анализатор VetAuto Hematology Analyzer BC-2800.

Результаты исследования и обсуждение

Под воздействием изучаемого комплекса у волнистых попугайчиков изменялась концентрация лейкоцитов крови (табл. 2).

Таблица 2

Динамика концентрации лейкоцитов крови у волнистых попугаев, 10⁹/л

Наименование группы	15-й день		30-й день		45-й день	
	Me±me	Cv, %	Me±me	Cv, %	Me±me	Cv, %
Норма	250±14.2					
Группа контроля	242± 12,05	1,82	239± 10,7	3,71	242± 9,5**	11,21
1-я группа опыта	244± 12,4**	9,63	251± 10,7**	8,54	248± 9,7**	32,01
2-я группа опыта	242± 12,8** 2,67 249± 12,1**		20,06		245± 10,4**	12,91
3-я группа опыта	242± 11,8**	31,96	243± 11,2	5,43	240± 10,8	29,77

На 15-е сутки опыта концентрация лейкоцитов у волнистых попугаев 1 опытной группы была выше на 0,8 (P <0,01); %, чем у контрольной группы волнистых попугаев, у 2–3-й группы опыта аналогичные с группой контроля значения. На 30-е сутки опыта концентрация лейкоцитов у волнистых попугаев 1–3 опытной группы – на 4,7 (P <0,01); 4,1 (P <0,01) и на 1,64% была выше, чем у контрольных волнистых попугаев. На 45-е сутки опыта у волнистых попугаев 1-2-й опытных групп концентрация лейкоцитов была выше, чем в контрольной группе, а у 3-й группы опыта ниже. Морфологические показатели находились в пределах нормы.

Концентрация эритроцитов в крови исследуемых волнистых попугаев изменилась под действием исследуемого полнорационного витаминно-минерального комплекса с пробиотиком (табл. 3).

На 15-е сутки опыта концентрация эритроцитов в крови у волнистых попугаев 1-й опытной группы была выше на 3,6 (P <0,01); % соответственно, чем у контрольной группы волнистых попугаев, у 2-3 группы опыта концентрация эритроцитов в крови была ниже на 5,2 (P <0,01); 10,1 (P <0,01). На 30-е сутки опыта концентрация эритроцитов в крови у волнистых попугаев 1-й опытной группы была выше на 2,2 (P <0,01); % соответственно, чем у контрольной группы волнистых попугаев, у 2-3 группы опыта концентрация эритроцитов в крови была ниже на 2,2 (P <0,01); 7,1 (P <0,01).

На 45-е сутки опыта у волнистых попугаев 1-3-й опытных групп концентрация эритроцитов в крови была выше, чем в контрольной группе. Морфологические показатели находились в пределах нормы.

Таблица 3

Концентрация эритроцитов крови у попугаев, $10^{12}/л$

Наименование группы	15-й день		30-й день		45-й день	
	Me±me	Cv, %	Me±me	Cv, %	Me±me	Cv, %
	5.13±1.75					
Группа контроля	4,1±0,04	4,34	4,5±0,19	16,99	4,4±0,68	40,10
1-я группа опыта	4,25±0,13**	14,87	4,6±0,48	36,01	4,7±0,93**	69,64
2-я группа опыта	3,9±0,08**	9,77	4,4±0,66	59,01	4,7±0,43**	41,33
3-я группа опыта	3,7±0,26**	36,54	4,2±0,08	8,34	4,9±0,43**	35,03

Под воздействием изучаемого комплекса у волнистых попугайчиков также изменялась концентрация гемоглобина в крови (табл. 4).

Таблица 4

Концентрации гемоглобина крови у волнистых попугаев, г/л

Наименование группы	15-й день		30-й день		45-й день	
	Me±me	Cv, %	Me±me		Me±me	Cv, %
Норма	183.32±23.25					
Группа контроля	175,00±0,34	0,46	175,00±22,58	24,76	179,00±59,12	37,57
1-я группа опыта	170,00±8,38**	12,44	183,00±56,93**	41,66	189,00±15,79**	20,77
2-я группа опыта	171,00±3,80**	5,56	175,00±54,92	49,53	195,00±58,48**	49,74
3-я группа опыта	168,00±20,34**	33,98	185,00±7,80	9,54	210,00±51,09*	34,73

Во время проведения опыта, в 15-ый день эксперимента у волнистых попугаев 1-3-й опытных групп концентрация гемоглобина в крови ниже на 2,9 (P <0,01); 2,3(P <0,01) и 4,1 (P <0,01) % по сравнению с группой контроля. На 30-ый день опыта у птиц групп опыта можно отметить увеличение концентрации гемоглобина в крови по сравнению с группой контроля. Ближе к концу эксперимента, на 45-ый день проведения – у птиц 1-3 группы опыта и контроля, установлена тенденция повышения концентрации гемоглобина в крови

Отмечаются изменения концентрации тромбоцитов в крови волнистых попугаев, из-за взаимодействия изучаемого полнорационного витаминно-минерального комплекса с *Bacillus subtilis* с организмом птиц (табл. 5).

Таблица 5

Концентрация тромбоцитов крови у волнистых попугаев в динамике, 10⁹/л

Наименование группы	15-й день		30-й день		45-й день	
	Me±me	Cv, %	Me±me		Me±me	Cv, %
Норма	60 ± 18.10					
Группа контроля	50,00± 3,54	35,29	51,00± 7,73	29,06	57,00± 13,29	52,74
1-я группа опыта	56,00± 8,45	61,26	62,00± 2,71 **	7,51	60,00± 9,27 *	50,09
2-я группа опыта	54,00± 1,80 **	13,09	56,00± 8,28 **	17,44	58,00± 27,12 **	53,37
3-я группа опыта	50,00± 5,15 **	72,65	55,00± 17,13 **	38,16	60,00± 21,57 **	40,41

На 15-ый день эксперимента концентрация тромбоцитов крови волнистых попугаев 1-2-й и групп опыта выше, у попугаев 3-й группы опыта столько же, как в группе контроля. На 30-ый день эксперимента у попугаев 1-3-й групп опыта отмечено повышение концентрации тромбоцитов крови по отношению к аналогам из группы контроля. На 45-ый день проведения опыта у птиц 1-3-й групп контроля концентрация тромбоцитов крови была выше, чем у птиц из группы контроля.

Заключение

На основании проведенных исследований можно подвести итог, что при регулярном применении витаминно-минерального комплекса с пробиотиком в виде гранул, наблюдается изменение качественных и количественных морфологических показателей крови. В 45-ый день исследования, в период отмены полнорационного комплекса уровни эритроцитов и гемоглобина продолжают оставаться на верхней границе физиологической нормы и выше, количество лейкоцитов и тромбоцитов при приеме гранул с витаминно-минеральным комплексом с пробиотиком в дозе 5 мг/100 г живой массы, остаются на уровне аналогов группы контроля, а у птиц других групп опыта снижается. Максимальные значения эритроцитов и гемоглобина как во время приема полнорационных гранул, так и в качестве последствия наблюдалось при приеме комплекса с содержанием *Bacillus subtilis* 5 мг/100 г живой массы. Комплекс с пробиотиком, витаминами и минералами положительно влияет на организм и физиологический статус попугая.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nomura, M.* Studies on amylase formation by *Bacillus subtilis*: V. Immunochemical studies of amylase produced by *Bacillus subtilis* / M. Nomura, Ts. Wada // *Journal of Biochemistry*. – 1958. – Vol. 45, No. 8. – P. 629.
2. *Nozrdin, G., Yakovleva, N., Novik, Ya., Ermakova, L., Arakantseva, L., Kiseleva, K.* (2023). Evaluation of the Effect of Vetom 1 in the Treatment of Knemidocoptes in Budgerigars. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*. 18. 125–130.
3. *Алаева, М.С.* Исследование методов лечения кнемидокоптоза у волнистых попугайчиков / М.С. Алаева, П.А. Прутская, Е.А. Вологжанина // *Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева*. – 2023. – № 1(17). – С. 6-10. – EDN HPDIB.
4. *Кистина А.* Пробиотики в рационах для кур / А. Кистина, Ю. Прытков, Б. Агеев, Э. Алиева // *Животноводство России*. – 2022. – № 11. – С. 8–9.

5. *Новик, Я.В.* Влияние пробиотических препаратов на основе *Bacillus subtilis* на массу гусят / Я.В. Новик, Г.А. Ноздрин, А.Г. Ноздрин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2(208). – С. 55–58.

Камшилова О.А., врач

(Областная клиническая больница № 2,
г. Тюмень)

Прокопьев Н.Я., доктор медицинских
наук, профессор

(Тюменский государственный универси-
тет)

Ананьев В.Н., доктор медицинских наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
(Государственный научный центр
Российской Федерации – Институт ме-
дико-биологических проблем Российской
академии наук)

Ананьева О.В., доктор медицинских наук,
профессор

Пашикина И.В., кандидат медицинских
наук, доцент

(Тюменский государственный медицин-
ский университет Министерства здра-
воохранения Российской Федерации)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.01

АДАПТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ У ЖЕНЩИН ПЕРИОДА ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА ПРИ КОМОРБИДНОЙ ПАТОЛОГИИ ДО И ПОСЛЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ

В статье представлен анализ изучения влияния солнечных магнитных бурь на уровень адаптационного потенциала (АП, у.е.) по Л.А. Коневских (АС № 2314019) у женщин периода пожилого возраста, получающих амбулаторное лечение по поводу коморбидной патологии (КП), включающей в себя ишемическую болезнь сердца (ИБС) без признаков сердечной недостаточности, железодефицитную анемию (ЖДА) и сахарный диабет (СД). Впервые в клинике внутренних болезней изучение влияния магнитных бурь на АП проведено у женщин, когда период пожилого возраста авторами был разделён на равные пятилетние промежутки жизни. Показано, что по мере увеличения паспортного возраста женщин магнитные бури значительно снижают адаптационные возможности организма. Способ оценки уровня АП по Л.А. Коневских, несмотря на простоту формулы подсчета, обладает существенным недостатком, ибо не отражает многообразия морфофункциональных особенностей человека в процессе онтогенеза.

Ключевые слова: женщины пожилого возраста, коморбидная патология, магнитные бури, адаптационный потенциал.

Kamshilova O.A.

Prokopyev N.Ya.

Ananьев V.N.

Ananeva O.V.

Pashkina I.V.

ADAPTIVE POTENTIAL IN ELDERLY WOMEN WITH COMORBID PATHOLOGY BEFORE AND AFTER MAGNETIC STORMS

The article presents an analysis of the study of the effect of solar magnetic storms on the level of adaptive potential (AP, c.u.) according to L.A. Konevskikh (AS № 2314019) in elderly women receiving outpatient

treatment for comorbid pathology (CP), including coronary heart disease (CHD) without signs of heart failure, iron deficiency anemia (IDA) and diabetes mellitus (DM). For the first time in the clinic of internal medicine, the study of the effect of magnetic storms on AP was carried out in women, when the period of old age was divided by the authors into equal five-year intervals of life. It has been shown that as the passport age of women increases, magnetic storms significantly reduce the adaptive capabilities of the body. The method of assessing the level of AP according to L.A. Konevskikh, despite the simplicity of the calculation formula, has a significant drawback, because it does not reflect the diversity of morphofunctional features of a person in the process of ontogenesis.

Keywords: *elderly women, comorbid pathology, magnetic storms, adaptive potential.*

Актуальность. Вопросы диагностики и лечения КП на протяжении многих лет постоянно обсуждаются на страницах журналов, различных съездах и конференциях [2, 3, 6], что связано не только с их высокой частотой заболеваемости, но и значительной смертностью. Смертность от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) занимает первое место в нашей стране и развитых странах мира [1, 11]. Известно, что на организм человека оказывают влияние различные погодные условия, в том числе геомагнитная активность (солнечные бури) [3, 5, 7, 8, 9, 10, 12].

Объект исследования: женщины периода пожилого возраста с КП, проживающие в Западной Сибири.

Предмет исследования: возрастные значения уровня адаптационного потенциала по расчетной методике Л.А. Коневских за равные 5-ти летние отрезки жизни женщин в пределах периода пожилого возраста.

Гипотеза исследования: во-первых, высказано предположение, что в связи с увеличением паспортного возраста женщин с КП адаптационные возможности их организма снижаются. Во-вторых, высокая солнечная гелио магнитная активность достоверно изменяет адаптационные возможности женского организма при КП (коморбидной патологии).

Хотелось бы обратить внимание на то, что еще в 2009 году редакция журнала Lancet отметила, что самой большой проблемой для здоровья человека является изменение климата, в том числе связанного с солнечной активностью [10, 12]. В доступной литературе мы не встретили исследований, указывающих влияние высокой солнечной активности на уровень АП у женщин периода пожилого возраста при коморбидной патологии проживающих в Западной Сибири.

Цель: у женщин периода пожилого возраста, находящихся на амбулаторном лечении по поводу коморбидной патологии, посредством расчетного способа по формуле Л.А. Коневских определить влияние высокой солнечной активности на уровень адаптационного потенциала.

Материал и методы. Оценка уровня АП проведена у 28 женщин $63,7 \pm 1,9$ лет, находящихся на амбулаторном лечении в ОКБ №2 г. Тюмени по поводу КП, включающей в себя ИБС без признаков сердечной недостаточности, ЖДА и СД. Для оценки состояния адаптационных механизмов рассчитывали значения АП по предложенной Л.А. Коневских формуле: $АП = 1,238 + 0,09 \times ЧСС$, где: ЧСС – частота сердечных сокращений (уд./мин.), 1,238 и 0,09 – свободные члены уравнения.

Оценка: менее 7,2 у.е. – удовлетворительный уровень адаптации; 7,21–8,24 – функциональное напряжение адаптационных механизмов; 8,25–9,85 – неудовлетворительная адаптация характеризует снижение функциональных возможностей системы кровообращения с недостаточной приспособляемой реакцией к физическим нагрузкам; более 9,86 – характеризует резкое снижение функциональных возможностей системы кровообращения с явлением срыва адаптационных механизмов целостного организма.

ЧСС была подсчитана пальпаторным методом на лучевой артерии в течение одной минуты. В соответствии с программой лечения, принятой в ГКБ № 2 г. Тюмени, всем женщинами осуществляется клинико-инструментальное обследование.

Мы обратили внимание на то, что в период со 2 по 5 апреля, с 9 по 11 апреля, и с 19 до 23 апреля 2024 года, т. е. в период высокой солнечной активности, состояние женщин ухудшилось. Женщины предъявляли жалобы на сильные головные боли, бессонницу, раздражительность, боли за грудиной, повышение артериального давления. Из анамнеза установлено, что 8 (28,6%) женщин в связи с резким повышением артериального давления вынуждены были вызвать скорую медицинскую помощь, 6 (21,4%) врача на дом, а 14 (50%) самостоятельно обратились в поликлинику. Мы решили сравнить показатели уровня АП у женщин периода пожилого возраста с КР до и во время солнечных магнитных бурь.

При оценке возраста женщин мы придерживались схемы возрастной периодизации онтогенеза человека, принятой на VII Всесоюзной конференции по проблемам возрастной морфологии, физиологии и биохимии АПН СССР в Москве в 1965 году. Согласно данной периодизации период пожилого возраста длится от 56 до 70 лет, т.е. 15 лет. Вполне естественно, что в течение этого периода жизни у женщин, например, в возрасте 56 лет, морфофункциональные показатели должны отличаться от возраста, например, 70 лет. В доступной литературе мы, во-первых, не встретили исследований, характеризующих уровень АП у одних и тех же женщин до и после высокой солнечной активности. Во-вторых, нет исследований, отражающих состояние АП у женщин в различные отрезки периода пожилого возраста. Впервые в клинике внутренних болезней мы разделили период пожилого возраста на равные 5-ти летние промежутки: от 56 до 60 лет ($58,6 \pm 1,5$; $n = 11$), от 61 до 65 ($63,7 \pm 1,6$; $n = 10$) лет, от 66 до 70 ($67,2 \pm 1,7$; $n = 7$) лет. Результаты исследования обработаны на персональном компьютере с использованием современных электронных программ (STATISTIKA). Оценка достоверности различий осуществлялась с использованием t критерия Стьюдента [4].

Результаты и обсуждение

Учитывая то, что в формулу расчетов АП входит ЧСС, мы провели её изучение у женщин, в течение 5 минут сидящих в кресле (табл. 1).

Таблица 1

Частота сердечных сокращений и уровень адаптационного потенциала (АП) у женщин периода пожилого возраста с коморбидной патологией до и в период высокой солнечной активности ($M \pm m$) ($P < 0,05$)

Время обследования	ЧСС	АП
56–60 лет		
Март	$83,21 \pm 1,43$	8,736
2–5 апреля	$88,39 \pm 1,64$	9,193
9–11 апреля	$88,26 \pm 1,68$	9,181
19–23 апреля	$87,75 \pm 1,76$	9,135
Различие	4,54	0,399
61–65 лет		
Март	$83,12 \pm 1,51$	8,718
2–5 апреля	$87,47 \pm 1,66$	9,110
9–11 апреля	$87,38 \pm 1,69$	9,102
19–23 апреля	$87,24 \pm 1,73$	9,089
Различие	4,12	0,371

66–70 лет		
Март	82,19 ± 1,64	8,635
2–5 апреля	86,36 ± 1,62	9,010
9–11 апреля	86,11 ± 1,67	8,987
19–23 апреля	85,97 ± 1,75	8,975
Различие	3,78	0,340

Обращает на себя, во-первых, внимание то, что в марте 2024 года ЧСС была достоверно ($p < 0,05$) реже, чем в дни высокой солнечной активности апреля. Так, у женщин 56–60 лет различие составило 4,54 уд/мин, у женщин 61–65 лет – 4,12 уд/мин, а у женщин 66–70 лет – 3,78 уд/мин. Во-вторых, по мере увеличения паспортного возраста женщин отмечалось урежение ЧСС. Так, в частности, в пределах одного возрастного периода онтогенеза ЧСС у женщин 66–70 лет в марте 2024 года стала реже на 1,02 уд/мин, а во время солнечных бурь на 2,03 уд/мин.

Характеризуя значения АП в марте 2024 года отметим, что у всех женщин с КП он, во-первых, имел неудовлетворительный уровень адаптации, свидетельствующий о снижении функциональных возможностей организма. Три имевшие место в апреле вспышки солнечной активности в абсолютных значениях, во-первых, превышали численные значения уровня АП. Во-вторых, несмотря на повышение паспортного возраста женщин в пределах одного периода онтогенеза, во время солнечных бурь адаптационные возможности организма даже несколько улучшались, несмотря на наличие КП.

Выводы. Таким образом, на основании выполненного исследования можно заключить, что уровень АП у женщин периода пожилого возраста с КП, подвергшихся воздействию высокого уровня солнечной активности зависит от их паспортного возраста. Условное и впервые проведенное в кардиологической практике разделение изучаемого возраста длительностью в 15 лет на три равные по продолжительности временные промежутки жизни, на наш взгляд, позволяет более детально выявлять функциональное напряжение адаптационных механизмов, выражающееся в достоверном учащении ЧСС. Тем не менее, считаем, что изучаемый нами способ оценки уровня АП по Л.А. Коневских, несмотря на простоту формулы подсчета, обладает существенным недостатком, ибо не отражает многообразия морфофункциональных особенностей человека в процессе онтогенеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов С.А. Сердечно-сосудистые заболевания в Российской Федерации: основные составляющие смертности и направления профилактики / С.А. Бойцов, С.И. Проваторов // 2018. № 5. С. 12–18.
2. Булкин М.Д. Распространенность ишемической болезни сердца в современном мире / М.Д. Булкин, Т.А. Коновальцева, И.Е. Трухмаева // Молодой ученый. 2023. № 32 (479). С. 19–21.
3. Виноградова Н.Г. Железодефицитные состояния при сердечно-сосудистых заболеваниях: влияние на прогноз и особенности коррекции / Н.Г. Виноградова, А.И. Чесникова // Южно-Российский журнал терапевтической практики. 2023. Т. 4. № 1. С. 7–18.
4. Гланц С. Медико-биологическая статистика. / С. Гланц. М: Практика, 1999. 459 с.
5. Деева М.А. Солнечная активность и ее влияние на жизнь и здоровье человека / М.А. Деева // Естественнаучные основы медико-биологических знаний. Материалы III Всероссий-

- ской конференции студентов и молодых ученых с международным участием. Редколлегия: Т.Г. Авачева [и др.]. Рязань, 2021. С. 60–62.
6. Особенности течения стабильной стенокардии напряжения на фоне железодефицитной анемии в амбулаторно-поликлинической практике. / А.Ю. Симион, А.В. Будневский, Е.С. Овсянников, Н.Е. Нехаенко, Н.И. Остроушко, Н.О. Бражников //Медицинский совет. 2023;17(13): 246–255.
 7. Оценка взаимосвязи обращаемости населения за медицинской помощью с факторами земной и космической погоды / С.Н. Носков, А.О. Карелин, Е.Г. Головина, О.М. Ступишина, Г.Б. Еремин //Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 8. С. 775-7781.
 8. Оценка риска здоровью населения с болезнями органов кровообращения при неблагоприятных погодных условиях. / Р.Б. Цаллагова, О.И. Копытенкова, Ф.К. Макоева, А.Р. Наниева // Гигиена и санитария. 2020. № 99(5). С. 488–492.
 9. Щетинина С.Ю. Влияние геомагнитной активности на состояние здоровья человека / С.Ю. Щетинина, Н.В. Юдичева //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 5-1 (56). С. 167–169.
 10. Costello A, Abbas M, Allen A, et al. Managing the health effects of climate change: Lancet and University College London Institute for Global Health Commission. //Lancet. 2009;373(9676):1693-1733. doi:10.1016/S0140-6736(09)60935-1.
 11. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Epidemiology of cardiac arrest in Europe. / J.T. Gräsner, J. Herlitz, I.B.M. Tjelmeland, et al. //Resuscitation. 2021;161: 61–79.
 12. Sarimov RM, Serov DA, Gudkov SV. Biological Effects of Magnetic Storms and ELF Magnetic Fields. Biology (Basel). 2023 Dec 8;12(12):1506. doi: 10.3390/biology12121506. PMID: 38132332

Биотехнология

Худайгулов Г.Г., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Шарипов Д.А., младший научный сотрудник

Стариков С.Н., младший научный сотрудник

Четвериков С.П., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
(Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.02

БАКТЕРИАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕРФТОРКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ

*Подобраны ассоциации бактерий *Pseudomonas mosselii* 5(3) + *Ensifer adhaerens* M1 и *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D + *Ensifer adhaerens* M1, способных к совместному росту в средах с перфторированными карбоновыми кислотами с количеством атомов углерода C8 и C9 и их деградации с высвобождением фторид-ионов до концентрации 18,05 мг/л. Рост микроорганизмов не ингибировался метаболитами и продуктами распада.*

Ключевые слова: дефторирование, перфторкарбоновые кислоты, биодеструкция, ассоциации микроорганизмов.

Hudaygulov G.G.

Sharipov D.A.

Starikov S.N.

Chetverikov S.P.

BACTERIAL ASSOCIATIONS FOR EFFICIENT DEGRADATION OF PERFLUOROCARBOXYLIC ACIDS

*Associations of *Pseudomonas mosselii* 5(3) + *Ensifer adhaerens* M1 and *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D + *Ensifer adhaerens* M1 capable of co-growth in environments with perfluorinated carboxylic acids containing carbon atoms C8 and C9 and their degradation, releasing fluoride ions up to a concentration of 18.05 mg/L, were selected. The growth of microorganisms was not inhibited by metabolites and degradation products.*

Keywords: defluorination, perfluorocarboxylic acids, biodegradation, microbial associations.

Вопросы антропогенного воздействия на окружающую среду из года в год остаются актуальными. Проблема охраны биосферы особенно остра, когда вопрос касается устойчивых загрязнителей. К таким загрязнителям относятся перфторорганические соединения [1], в том числе перфторкарбоновые кислоты (ПФКК), которые широко применяются в самых различных сферах деятельности человека по причине обладания комбинацией двух основных свойств – высокой активности в качестве ПАВ и чрезвычайной химической стойкости. Они являются

важными компонентами для производства моющих средств, косметики, фармацевтики, текстиля и других продуктов [2]. Однако, именно эти свойства являются причиной беспокойства. Помимо прочего ПФКК обладают способностью к биоаккумуляции [3], нарушают микробиом почвы и работу ферментов [4].

Минерализация ксенобиотиков, в частности, перфторорганических соединений, при помощи микроорганизмов с экологической и экономической точек зрения является наиболее применимым и технологичным методом. Существенной проблемой в вопросе биоразложения ПФКК является устойчивость связи С- F . Описано несколько штаммов способных к расщеплению такой связи это *Acidimicrobium* sp. A6 [5], *Delftia acidovorans* D4B [6], *Pseudomonas parafulva* YAB-1 [7] и *P. aeruginosa* HJ4 [8]. Ранее нами было исследована возможность деградации ПФКК монокультурами бактерий [9], при этом обнаружено, что бактерии *Pseudomonas mosselii* 5(3) способны разлагать перфторкарбоновые кислоты только до C_6 . В связи с этим поиск и составление ассоциаций микроорганизмов для преодоления этого барьера, а также оценка их совместной жизнедеятельности и эффективности является актуальной задачей с научной и практической точек зрения.

Объекты и методы исследования. В работе использовались микроорганизмы из коллекции УИБ УФИЦ РАН, способные к деградации ПФКК: *Pseudomonas mosselii* 5(3), *P. plecoglossicida* 2.4-D, *Ensifer adhaerens* M1. Биологическую деградацию ПФКК бактериями и их ассоциациями оценивали в жидкой среде Раймонда с перфтороктановой (C_8) и перфторнонановой (C_9) кислотами в качестве единственного источника углерода и энергии путем количественного определения высвободившегося свободного фторид-иона методом ионной высокоэффективной жидкостной хроматографии [9].

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлена динамика накопления в культуральной жидкости фторид-ионов при росте на среде Раймонда, где в качестве единственного источника углерода и энергии выступала C_8 перфторкарбоновая кислота.

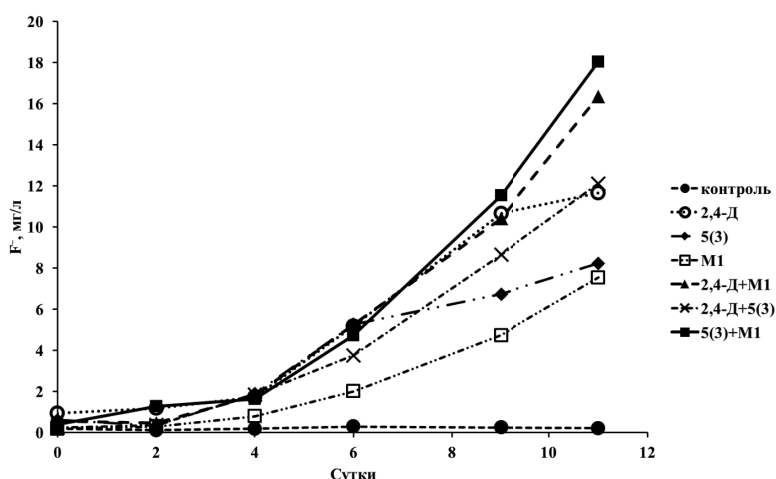


Рис. 1. Динамика накопления фторид-ионов микроорганизмами и их ассоциациями при росте на среде Раймонда с C_8 перфторкарбоновой кислотой в качестве единственного источника углерода и энергии.

По результатам эксперимента ассоциация штаммов 2,4-Д и M1, а также 5(3) и M1 (5(3)+M1) показали наилучшие результаты. На 11-е сутки концентрация F^- составила 16 мг/л и 18 мг/л, соответственно. Ни один из штаммов индивидуально не был способен к такой степени разложения ПФКК. Распределение концентраций накопленного фторид-иона для монокультур на 11 сутки

составляло для М1 – 5 мг/л, для 5(3) -10 мг/л и для 2,4-Д – 6 мг/л. При этом скорость разложения С8 перфторкарбоновой кислоты носит линейный характер когда как для ассоциаций 2,4-Д+М1 и 5(3)+М1 наблюдается экспоненциальный рост. Что свидетельствует о синергетическом эффекте совместного применения двух культур при биологическом разложении перфторкарбоновых кислот.

При использовании С9 ПФКК в качестве субстрата наблюдалась иная картина накопления F^- . Из рис. 2 видно, что во всех вариантах до 6 суток идет активный рост микроорганизмов и далее выходит на плато. Вероятно, это связано с накоплением продуктов распада – короткоцепочечных перфторированных соединений и с возросшей нагрузкой на ферментные системы исследуемых микроорганизмов.

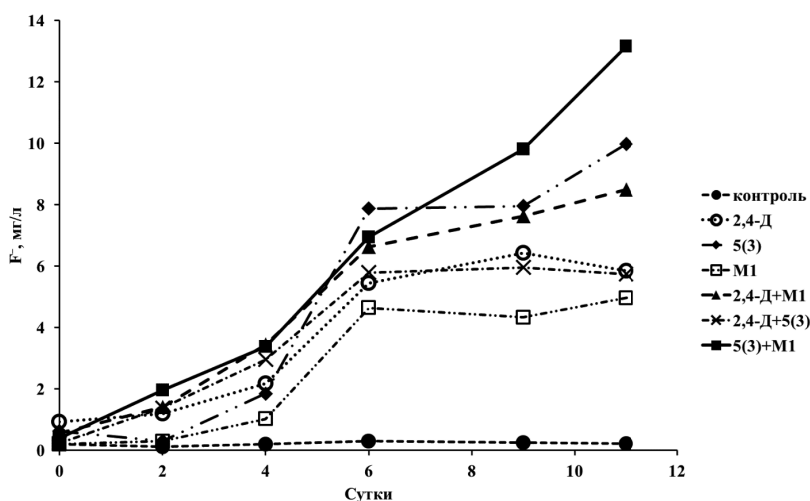


Рис. 2. Динамика накопления фторид-ионов микроорганизмами и их ассоциациями при росте на среде Раймонда с С9 перфторкарбоновой кислотой в качестве единственного источника углерода и энергии.

Ранее нами было показано, что при накоплении вещества с соотношением m/z 319 происходит ингибирование роста и развития микроорганизмов [9]. Наиболее активно высвобождение фторид-иона на протяжении всего эксперимента происходило в варианте 5(3)+М1, что свидетельствует о низком влиянии высвобождающихся метаболитов в процессе биодеструкции С9 ПФКК.

В работе показано, что при использовании ассоциаций микроорганизмов для биологической деструкции С8 и С9 перфторкарбоновых кислот возможна более активная деструкция ПФКК в сравнении с монокультурами, о чем свидетельствуют более высокие концентрации накапливаемых в культуральной жидкости фторид-ионов. Наибольшие концентрации фторид-ионов наблюдались при росте на С8 и С9 ПФКК в качестве единственного источника углерода при совместном культивировании штаммов бактерий 5(3) и М1. Применение ассоциаций микроорганизмов-деструкторов устойчивых к продуктам метаболизма перфторкарбоновых кислот и фторид-ионам позволит создать на их основе эффективные биологические препараты и технологии очистки объектов, загрязненных фторорганическими соединениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-24-00154). Использовалось оборудование ЦКП «Агидель» УФИЦ РАН (Уфа, Россия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Report of the Conference of the Parties of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its fourth meeting, 4-8 May // Geneva: Stockholm Convention Secretariat. – 2009. UNEP/POPS/COP.4/38. P. 66–69.
2. Fujii S., Tanaka S., Hong Lien N. P., Qiu Y., Polprasert C. New POPs in the water environment: Distribution, bioaccumulation and treatment of perfluorinated compounds: A review paper // Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA 2007. V. 56(5) – P. 313–326.
3. Herzke D., Huber S., Bervoets L., D'Hollander W., Hajslova J., Pulkrabova J., Brambilla G., De Filippis S.P., Klenow S., Heinemeyer G. Perfluorinated alkylated substances in vegetables collected in four European countries; occurrence and human exposure estimations // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2013. V20. – P. 7930–7939. DOI: 10.1007/s11356-013-1777-8.
4. Zhang X., Gao X., Li C. et al. Fluoride contributes to the shaping of microbial community in high fluoride groundwater in Qiji County, Yuncheng City, China // Sci Rep. – 2019. V.9 – P. 14488. DOI: 10.1038/s41598-019-50914-6
5. Huang S., Jaffé P. Defluorination of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) by Acidimicrobium sp. Strain A6 // Environmental Science & Technology. – 2019. V. 53(19) – P. 11410-11419. DOI: 10.1021/acs.est.9b04047
6. Harris J., Coon C., Doherty M., McHugh E., Warner M., Walters C., Orahod O., Loesch A., Hatfield D., Sitko J., Almand E., Steel J. Engineering and characterization of dehalogenase enzymes from Delftia acidovorans in bioremediation of perfluorinated compounds // Synthetic and Systems Biotechnology. -2022. V.7(2). – P. 671–676. DOI: 10.1016/j.synbio.2022.02.005.
7. Chiriac F.L., Stoica C., Iftode C., Pirvu F., Petre V.A., Paun I., Pascu L.F., Vasile G.G., Nita-Lazar M. Bacterial Biodegradation of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorosulfonic Acid (PFOS) Using Pure Pseudomonas Strains // Sustainability -2023. V. 15 – P. 14000. DOI:10.3390/su151814000.
8. Kwon B.G., Lim H.J., Na S.H., Choi B.I., Shin D.S., Chung S.Y. Biodegradation of perfluorooctanesulfonate (PFOS) as an emerging contaminant // Chemosphere. -2014. V.5 – P. 109-221. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.072.
9. Chetverikov S., Hkudaygulov G., Sharipov D., Starikov S., Chetverikova D. Biodegradation Potential of C7-C10 Perfluorocarboxylic Acids and Data from the Genome of a New Strain of Pseudomonas mosselii 5(3) // Toxics. – 2023. V. 11. – P. 1001. DOI:10.3390/toxics11121001.

Черкашина С.В., аспирант
Мальцева И.А., доктор биологических наук, профессор, декан факультета
Цюпа Е.А., аспирант
(Мелитопольский государственный университет)
Яковийчук А.В., кандидат биологических наук, доцент
(Мелитопольский государственный университет; Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.03

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА БИОФИКСАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА *CHLOROCOCCUM OLEOFACIENS* (CHLOROPHYCEAE, CHLOROPHYTA) В УСЛОВИЯХ ПИТАТЕЛЬНОГО СТРЕССА

В статье приведены результаты анализа продуктивности почвенного штамма *Chlorococcum oleofaciens*, и его секвестрационной способности при различных соотношениях азота и фосфора в среде культивирования. Установлено, что ограничение питательных элементов в среде снижало нарастание биомассы и биофиксацию CO_2 . Общее количество утилизированного CO_2 зависит от концентрации азота в питательной среде, а также от количества хлорофилла.

Ключевые слова: биосеквестрация, азот, фосфор, продуктивность, хлорофилл.

Cherkashina S.V.
Maltseva I.A.
Tsupa K.A.
Yakoviichuk A.V.

CHLOROCOCCUM OLEOFACIENS CARBON DIOXIDE BIOFIXATION POTENTIAL ASSESSMENT (CHLOROPHYCEAE, CHLOROPHYTA) UNDER CONDITIONS OF NUTRITIONAL STRESS

The article presents the results of the analysis of the productivity of the soil strain *Chlorococcum oleofaciens*, and its sequestration ability at different ratios of nitrogen and phosphorus in the cultivation medium. It was found that the restriction of nutrients in the medium reduced the growth of biomass and bio-fixation of CO_2 . The total amount of CO_2 disposed of depends on the concentration of nitrogen in the nutrient medium, as well as on the amount of chlorophyll.

Keywords: bio sequestration, nitrogen, phosphorus, productivity, chlorophyll.

Одной из актуальных современных проблем глобального уровня, требующих решения, является уменьшение выбросов парниковых газов и, в первую очередь, углекислого газа. Решение данной проблемы может быть достигнуто также за счет увеличения его поглощения фотосинтезирующими организмами. Биологическое связывание углекислого газа, или биосеквестрация, может стать эффективным инструментом уменьшения концентрации углекислого газа в атмосфере. Одним из новых подходов биосеквестрации является использование

для этой цели водорослей и цианобактерий [19, 28]. Эти организмы характеризуются большим разнообразием, высокой скоростью роста и продуктивностью. При этом многие виды устойчивы к действию различных экстремальных факторов окружающей среды, хорошо растут в различных биореакторах, в открытых резервуарах и ставках, которые могут быть размещены на пустынных, техногенных, солончаковых и др. территориях не пригодных для выращивания основных технических и продовольственных культур, для их культивирования в качестве источника питательных элементов может быть использована сточная вода [12, 21, 24]. Биомасса, образуемая водорослями и цианобактериями, богата на липиды, белки, углеводы и другие биологически активные соединения и может быть переработана для получения различных коммерческих продуктов, в том числе биотоплива, кормовых добавок, использована для биоремедиации и т.п. [23, 29]. Часто для индукции синтеза ценных метаболитов используют ограничение питательных элементов в среде роста. Есть данные о значительном росте уровня липидов при культивировании микроводорослей в условиях азотного и фосфорного голодания [22, 26]. Эффективность изменения концентрации питательных элементов на скорость биофиксации углекислого газа малоисследована [8], но с точки зрения внедрения технологий улавливания, утилизации и хранения углерода (углеродного улавливания, утилизации и хранения – CCUS) [15] представляет большой интерес.

Как свидетельствуют недавние исследования многие виды зеленых водорослей не только представляют высокий интерес как источники липидов, ценных жирных кислот, витаминов, но и имеют высокие секвестрационные характеристики [4, 7]. Широко распространённые виды *Chlorococcum* Menegh. хорошо известны своей биотехнологической ценностью [5, 20, 25] и могут стать полезными для решения задач улавливания и утилизации углекислого газа. Одним из многообещающих источников липидов является *Chlorococcum oleofaciens* Trainor et H.C. Bold [5, 20]. При изучении разнообразия почвенных микроводорослей лесной подстилки насаждения *Quercus robur* L. был выделен в культуру и изучен новый штамм CAMU MZ–Ch4 [16].

Целью данной работы было изучение роста и скорости биофиксации CO₂ новым штаммом *Chlorococcum oleofaciens* CAMU MZ–Ch4 в условиях азотного и фосфорного голодания.

Материалы и методы

Культура микроводорослей

Штамм *Chlorococcum oleofaciens* CAMU MZ–Ch4 изолирован из лесной подстилки Самарского леса (N 48°39'30.44", E 35°39'2.17"). Штамм в культуре поддерживается при 15.0±2.0 °C в пробирках, освещенных белыми диодами с интенсивностью света 120 Лк и режимом освещения 16:8 ч (свет/темнота) на среде BBM (Bischoff, Bold, 1963). Для эксперимента клетки *Chlorococcum oleofaciens* инокулировали в 150,0 мл свежей среды BBM. При наступлении экспоненциальной фазы роста (через 5 дней) эту культуру использовали для постановки эксперимента. Концентрация азота и фосфора рассчитывалась как NO₃⁻ – N и PO₄³⁻ – P. Использовали такие экспериментальные концентрации: 38,4 мг N л⁻¹ и 7,2 мг P л⁻¹ (вариант 1); 25,8 мг N л⁻¹ и 7,2 мг P л⁻¹ (вариант 2); 12,9 мг N л⁻¹ и 7,2 мг P л⁻¹ (вариант 3); 6,4 мг N л⁻¹ и 0,5 мг P л⁻¹ (вариант 4). Контролем служила среда BBM, содержащая 41,3 мг N л⁻¹ и 53,4 мг P л⁻¹. Эксперимент проводили в колбах Эрленмейера объемом 250,0 мл с 150,0 мл среды (контрольной или экспериментальной) при 23,0±2,0 °C. Начальная концентрация клеток была 2,89×10⁵ клеток мл⁻¹. Концентрацию клеток измеряли с помощью автоматического счетчика клеток TC20 Automated Cell Counter (Bio-Rad Laboratories, USA). Интенсивность света составляла 5000 Лк (70,0 мкмоль фотонов м⁻² сек⁻¹), 4000 К и режимом освещения 16:8 ч (свет/темнота). Культуры аэрировали воздухом с помощью аквариумного компрессора Hailea ASCO-308 (Hailea, China). Воздух подавали через стеклянную трубку с внутренним диаметром 4 мм со скоростью 0,1 л мин⁻¹.

Оценка роста и продуктивности штамма

Рост микроводорослей оценивали путем измерения сухой массы (СВ). Измеренный сухой вес выражали в г л⁻¹ (В). Объемная продуктивность биомассы (Р) рассчитывалась по формуле [18]:

$$P \text{ (г СВ л}^{-1} \text{ день}^{-1}) = (X_2 - X_1) / (t_2 - t_1) \text{ (1)},$$

где X_2 – сухая биомасса (г СВ л⁻¹) во время t_2 (день) и X_1 – сухая биомасса (г СВ л⁻¹) во время t_1 (день).

Биофиксацию CO₂ (F) рассчитывали по уравнению [18] с уточнениями на биомассу (N) в момент времени и на продуктивность биомассы (P):

$$F = P \text{ (или N)} (C_c / 100) (MCO_2 / MC) \text{ (2)},$$

где P – продуктивность биомассы (г СВ л⁻¹ день⁻¹) или N – биомасса (г СВ л⁻¹), C_c – содержание С в биомассе (%), MCO_2 , MC – молекулярная масса CO₂ и С соответственно.

Содержание углерода (C) в биомассе *Chlorococcum oleofaciens* считали равным 48,4 % согласно данным элементарного анализа CHNS [17].

Определение содержания хлорофиллов проводили по методу [6]. Экстракцию пигментов из биомассы 100,0% ацетоном. Для этого 10,0 mg биомассы, отделенной от среды центрифугированием (10 мин; 3,000 rpm; 530× g), подвергали 3-кратному замораживанию-размораживанию с целью разрушения клеточных оболочек. После чего добавляли 4,0 мл ацетона с целью создания соотношения биоматериал-экстрагент 1:80 (w:v) и дополнительно гомогенизировали биомассу путем растирания с кварцевым песком. Полученную смесь герметично закрывали и оставляли на 24 часа при температуре 25,0 °C в темном месте для полной экстракции пигментов. Далее ацетоновый экстракт отделяли от осадка центрифугированием (10 мин; 10,000 rpm; 6,000 g; 4.0 °C). Анализировали интенсивность поглощения экстракта пигментов на спектрофотометре Ulab 102 (Ulab, China) при длинах волн: 662,0; 645,0 нм, что соответствует максимуму поглощения для Хл а, b. Содержание хлорофиллов выражали в мг/г сухой биомассы, расчёты проводили по следующим уравнениям [6]:

$$Хл_a = 11,85 E_{662} - 2,35 E_{645} \text{ (3)}$$

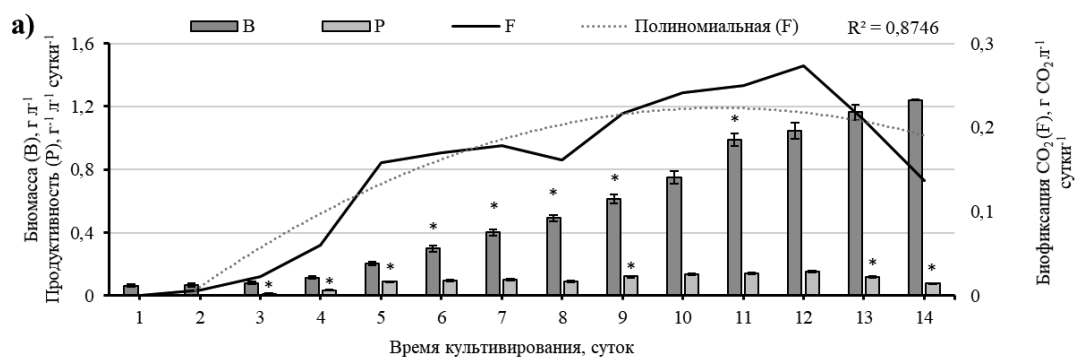
$$Хл_b = 18,61 E_{645} - 3,96 E_{662} \text{ (4)}$$

Статистический анализ проводился с помощью Statistica ver. 12.0. Для построения графиков использовали программное обеспечение Microsoft Excel ver. 1903. Достоверность отличий рассчитывали, используя тест ANOVA. Достоверными считали разницу при $p \leq 0.05$.

Результаты

Рост и продуктивность биомассы

Концентрация биомассы *Chlorococcum oleofaciens* увеличивалась на протяжении всего времени культивирования (рис. 1).



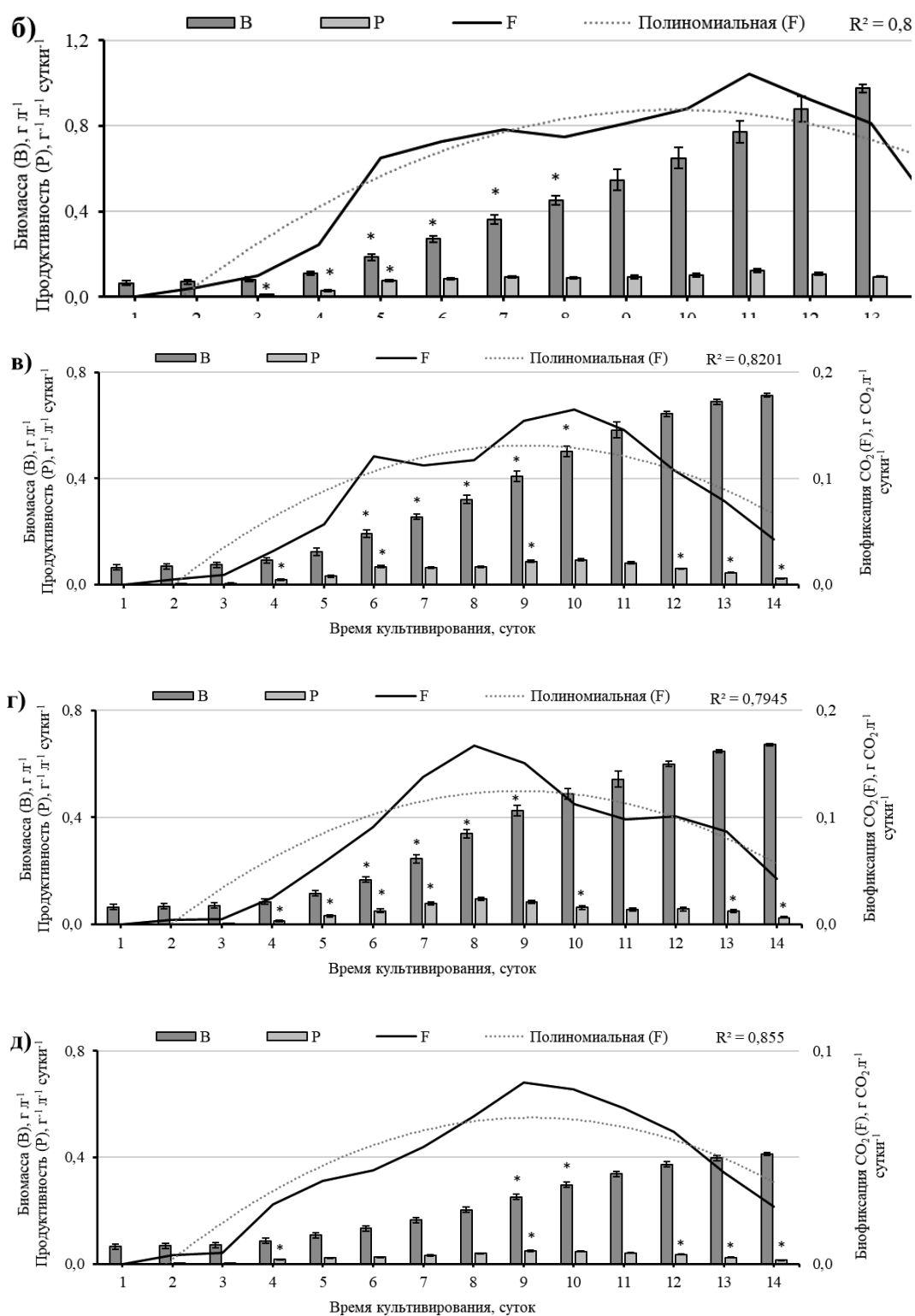


Рис. 1. Скорость роста (B), продуктивность (P) и биофиксация CO₂ (F) *Chlorococcum oleofaciens* SAMU MZ–Ch4 в различных вариантах эксперимента: а) контроль; б) вариант 1; в) вариант 2; г) вариант 3; д) вариант 4. Примечание: * – разница достоверна относительно предыдущего значения на уровне $p \leq 0,05$.

Первые 3–4 дня наблюдалась адаптация штамма к условиям роста, а потом начинался экспоненциальный рост, сопровождающийся быстрым накоплением биомассы. В контроле и в 1 варианте эксперимента замедление роста и продуктивности наблюдалось на 13–14 день, а в остальных вариантах эксперимента – с 11 и 12 дня. Максимальная биомасса на 14 день роста была в контроле и соответствовала 1,24 г л⁻¹. В экспериментальных питательных средах она была ниже и составляла: 82,5 % (вариант 1), 57,5 % (2), 54,1 % (3) и 33,2 % (4) от контрольных значений. Наибольший прирост биомассы в единицу времени наблюдался в контроле и варианте 1 с 10 по 12 день, а в остальных вариантах эксперимента, где содержание элементов питания было небольшим, – с 9 по 11 день.

Биофиксация CO₂

Общее количество рециклизованного CO₂ *Chlorococcum oleofaciens* за 14 суток эксперимента изменялось от 0,59 г CO₂ л⁻¹ до 2,21 г CO₂ л⁻¹ в различных условиях роста (табл. 1). Скорость биофиксации CO₂ в экспоненциальной фазе роста *Chlorococcum oleofaciens* наибольшей была в контроле и лежала в диапазоне 0,16–0,27 г CO₂ л⁻¹ день⁻¹. Близкая к контролю скорость утилизации CO₂ была в условиях варианта 1: 0,14–0,22 г CO₂ л⁻¹ день⁻¹. Ограничение питательных элементов в среде роста снижало нарастание биомассы и биофиксацию CO₂. Минимальная суточная утилизация CO₂ была в варианте 4: 0,03–0,09 г CO₂ л⁻¹ день⁻¹. Суммарное количество рециклизованного CO₂ достоверно зависело от концентрации азота в питательной среде – коэффициент корреляции Спирмана $r_s = 0,94$, а также от количества хлорофиллов ($r_s = 0,91$). Концентрация фосфора оказывала влияние на содержание хлорофиллов ($r_s = 0,91$).

Таблица 1

Биомасса и биофиксация CO₂ *Chlorococcum oleofaciens* CAMU MZ–Ch4 за 14 дней в различных вариантах эксперимента (M±sd)

Варианты эксперимента	Биомасса за 14 суток, г СВ л ⁻¹ (n=3)	Содержание хлорофиллов (a, b), мг г ⁻¹ СВ (n=3)	Скорость биофиксация CO ₂ в экспоненциальной фазе роста, г CO ₂ л ⁻¹ день ⁻¹ (n=9)	Утилизированный (рециклированный) CO ₂ за 14 суток, г л ⁻¹ (n=3)	Соотношение N/P
Контроль	1,24±0,002	6,35±0,071	0,21±0,042	2,21±0,008	0,77/1
1	1,02±0,006*	2,61±0,092*	0,17±0,024	1,69±0,007*	5,33/1
2	0,71±0,007*	2,57±0,022*	0,12±0,035*	1,15±0,012*	3,58/1
3	0,67±0,004*	0,27±0,045*	0,11±0,035*	1,07±0,012*	1,79/1
4	0,41±0,005*	0,36±0,042*	0,06±0,017*	0,59±0,017*	12,8/1

Примечание: * – разница достоверна относительно контроля на уровне $p \leq 0,05$.

Для физиологической оценки способности водорослей к фиксации CO₂ важным показателем является количество ключевых фотосинтезирующих пигментов – хлорофиллов. Совместное измерении скорости образования биомассы, концентрации хлорофилла и поглощения CO₂ позволяет оценивать динамику фотосинтеза и фотозащитных процессов, делать заключения о функциональной активности фотосистемы II (PSII) и относительной потери поглощенного света из-за нефотохимического тушения (NPQ). А в условиях питательного стресса также анализировать активность антиоксидантной защиты и преодоления окислительных повреждений. Содержание хлорофиллов максимальным было в контроле (табл. 1) и соответствовало мак-

симальным значениям утилизированного CO₂. Однако между скоростью биофиксации CO₂ и концентрацией хлорофиллов связь установить не удалось. О сложном и нелинейном характере зависимостей между содержанием хлорофиллов и ассимиляции углерода сообщалось для зеленых водорослей *Monoraphidium sp.*, *S. obliquus* [11]. При оценке скорости фиксации CO₂ у *Chlorella sp.* наблюдали уменьшение содержания хлорофиллов к концу эксперимента, что объяснялось нарастанием дефицита азота [3].

Важность подбора оптимальных концентраций азота и фосфора отмечалась при исследовании фиксации CO₂ штаммом *Parachromella kessleri* НУ-6 [8]. Было установлено, что высокие концентрации азота приводили к увеличению накапливаемой биомассы, однако продуктивность биомассы была выше при более низких концентрациях азота. Для *Parachromella kessleri* НУ-6 концентрация общего азота 47,4 мг N л⁻¹ и соотношение N/P 10:1 было оптимальным. Максимизация биомассы и фиксации CO₂ при минимальном внесении питательных веществ необходима для снижения затрат, связанных с поставкой питательных веществ [22].

В целом полученные результаты согласуются с данными других исследований. Средняя скорость фиксации CO₂ *Chlorococcum oleofaciens* составляла 0,21 г л⁻¹ день⁻¹ и была сопоставима с максимальными показателями 0,225 г л⁻¹ день⁻¹ у *Chlorella vulgaris*, выращиваемой при температуре 25 °С и освещении 2500 Лк [22].

Скорость утилизации CO₂ различными видами зеленых водорослей лежит в диапазоне от 0,1 гCO₂ л⁻¹ день⁻¹ до 6 гCO₂ л⁻¹ день⁻¹ и зависит от вида водоросли, а также концентрации CO₂ в культуре, температуры, pH, условий освещения [1, 3, 9, 10, 13, 14]. Также большое значение имеет доступность элементов питания в среде культивирования, что подтверждено в экспериментах с *Chlorococcum oleofaciens*.

Выводы

Содержание азота и фосфора в питательной среде оказывает существенное влияние на рост *Chlorococcum oleofaciens* CAMU MZ-Ch4, а также на скорость биофиксации CO₂. Максимальная продуктивность биомассы и утилизация CO₂ получены при концентрации азота и фосфора 41,3 мг N л⁻¹ и 53,4 мг P л⁻¹. Средняя скорость биофиксации CO₂ *Chlorococcum oleofaciens* была 0,21 г CO₂ л⁻¹ день⁻¹, а в экспоненциальной фазе роста достигала 0,27 г CO₂ л⁻¹ день⁻¹. Ограничение питательных элементов в среде роста снижало нарастание биомассы и биофиксацию CO₂. Общее количество утилизированного CO₂ зависело от концентрации азота в питательной среде ($r_s = 0,94$), а также от количества хлорофилла (a, b) ($r_s = 0,91$). Концентрация фосфора оказывала достоверное влияние на содержание хлорофиллов (a, b) ($r_s = 0,91$).

Биосеквестрационный потенциал *Chlorococcum oleofaciens* достаточно высокий и сравнимый с лучшими показателями других зеленых водорослей.

Полученные данные представляют интерес для разработки новых технологий биотехнологических производств с дополнительным положительным эффектом, связанным с решением глобальной экологической проблемы накопления в атмосфере углекислого газа – одной из причин глобального потепления.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы «Секвестрационный потенциал микроводорослей и цианобактерий антропогенно-трансформированных экосистем Запорожской области в условиях возрастающей аридизации климата» (FRRS-2024-0003; № 124040100028-6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Adamczyk M., Lasek J., Skawińska A. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana* / Adamczyk M., Lasek J., Skawińska A. // Appl Biochem Biotechnol. – 2016. – № 179(7). – С. 1248–1261. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-016-2062-3>

2. *Bischoff H.W., Bold H.C.* Phycological Studies IV. Some Soil Algae from Enchanted Rock and Related Algal Species / Bischoff H.W., Bold H.C. – 4-е изд. – Texas: University of Texas Publication №. 6318, 1963 – 95 с.
3. *Butti S.K., Venkata Mohan S.* Photosynthetic and Lipogenic Response Under Elevated CO₂ and H₂ conditions–high carbon uptake and fatty acids unsaturation / Butti S.K., Venkata Mohan S. // *Front Energy Res.* – 2018. – № 6. – С. 27. <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2018.00027>
4. *Chaudhary R., Dikshit A.K., Tong Y.W.* Carbon-dioxide biofixation and phycoremediation of municipal wastewater using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* / Chaudhary R., Dikshit A.K., Tong Y.W. // *Environ Sci Pollut Res Int.* – 2018. – № 25(21). – С. 20399-20406. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-9575-3>
5. *Del Río E., García-Gómez E., Moreno J., Guerrero M.G., García-González M.* Microalgae for oil. Assessment of fatty acid productivity in continuous culture by two high-yield strains, *Chlorococcum oleofaciens* and *Pseudokirchneriella subcapitata* / Del Río E., García-Gómez E., Moreno J., Guerrero M.G., García-González M. // *Algal Res.* – 2017. – № 23. – С. 37–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2017.01.003>
6. *Dere Ş., Güneş T., Sivaci R.* Spectrophotometric determination of chlorophyll - A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents / Dere Ş., Güneş T., Sivaci R. // *Turk. J. Bot.* – 1998. – № 22. – С. 13–16.
7. *Duarte J.H., de Moraes E.G., Radmann E.M., Costa J.A.V.* Biological CO₂ mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina* sp. / Duarte J.H., de Moraes E.G., Radmann E.M., Costa J.A.V. // *Bioresource Technology.* – 2017. – № 234. – С. 472-475. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.066>
8. *Farooq W.* Maximizing energy content and CO₂ bio-fixation efficiency of an indigenous isolated microalga *Parachlorella kessleri* HY-6 through nutrient optimization and water recycling during cultivation / Farooq W. // *Front Bioeng Biotechnol.* – 2022. – № 10(9). – С. 804608. <http://dx.doi.org/10.3389/fbioe.2021.804608>
9. *Gautam K., Pareek A., Sharma D.K.* Exploiting microalgae and macroalgae for production of biofuels and biosequestration of carbon dioxide – a review / Gautam K., Pareek A., Sharma D.K. // *International Journal of Green Energy.* – 2015. – № 12(11). – С. 1122–1143. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.893239>
10. *Ho S.H., Chen C.Y., Lee D.J., Chang J.S.* Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems – a review / Ho S.H., Chen C.Y., Lee D.J., Chang J.S. // *Biotechnology Advances.* – 2011. – № 29(2). – С. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.11.001>
11. *Hupp J., McCoy J. I. E., Millgan A. J., Peers G.* Simultaneously measuring carbon uptake capacity and chlorophyll a fluorescence dynamic in algae / Hupp J., McCoy J. I. E., Millgan A. J., Peers G. // *Algal Research.* – 2021. – № 58. – С. 102399. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102399>
12. *Kamyab H., Md Din M.F., Ponraj M., Keyvanfar A., Rezanian S., Taib S.M., Abd Majid M.Z.* Isolation and screening of microalgae from agro-industrial wastewater (POME) for biomass and biodiesel sources / Kamyab H., Md Din M.F., Ponraj M., Keyvanfar A., Rezanian S., Taib S.M., Abd Majid M.Z. // *Desalination and Water Treat.* – 2016. – № 57. – С. 29118–29125. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1139101>
13. *Kassim M.A., Meng T.K.* Carbon dioxide (CO₂) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production / Kassim M.A., Meng T.K. // *Sci Total Environ.* – 2017. – № 15(584–585). – С. 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.172>
14. *Kobayashi N., Barnes A., Jensen T., Noel E., Andlay G., Rosenberg J.N., Betenbaugh M.J., Guarneri M.T., Oyler G.A.* Comparison of biomass and lipid production under ambient carbon dioxide vigorous aeration and 3% carbon dioxide condition among the lead candidate *Chlorella* strains screened by various photobioreactor scales / Kobayashi N., Barnes A., Jensen T., Noel E., And-

- lay G., Rosenberg J.N., Betenbaugh M.J., Guarnieri M.T., Oyler G.A. // *Bioresource Technology*. – 2015. – № 198. – С. 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.124>
15. Koh, M.H. CO₂ Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Policy Trends in the European Union (EU) and Major European Countries / Koh, M.H. // *Korean Public Land Law Assoc.* – 2022. – № 100. – С. 463–483. <https://doi.org/10.30933/kpllr.2022.100.463>
16. Maltsev Y.I., Konovalenko T.V. New finding of green algae with potential for algal biotechnology, *Chlorococcum oleofaciens* and its molecular investigation / Maltsev Y.I., Konovalenko T.V. // *Regul. Mech. Biosyst.* – 2017. – № 8. – С. 532–539. <https://doi.org/10.15421/021782>
17. Miao G., Zhu C.C., Wang J.J., Tan Z.C., Wang L., Liu J.L., Kong L. Z., Sun Y. H. Efficient one-pot production of 1,2-propanediol and ethylene glycol from microalgae (*Chlorococcum* sp.) in water / Miao G., Zhu C.C., Wang J.J., Tan Z.C., Wang L., Liu J.L., Kong L.Z., Sun Y.H. // *Green Chem.* – 2015. – № 17(4). – С. 2538–2544. <http://dx.doi.org/10.1039/c4gc02467b>
18. Morais M.G., Costa J.A.V. Carbon dioxide mitigation with *Chlorella kessleri*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors / Morais M.G., Costa J.A.V. // *Biotechnol. Lett.* – 2022. – № 29. – С. 1349–1352. <https://doi.org/10.1007/s10529-007-9394-6>
19. Nguyen L.N., Vu M.T., Vu H.P., Johir Md A.H., Labeeuw L., Ralph P.J., Indra Mahlia T.M., Pandey A.K., Sirohi R., Nghiem, L.D. Microalgae-based carbon capture and utilization: A critical review on current system developments and biomass utilization / Nguyen L.N., Vu M.T., Vu H.P., Johir Md A.H., Labeeuw L., Ralph P.J., Indra Mahlia T.M., Pandey A.K., Sirohi R., Nghiem, L.D. // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2022. – № 53(2). – С. 216–238. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2047141>
20. Pauline J.M.N., Achary A. Novel media for the effective lipid production of *Chlorococcum oleofaciens*: A RSM approach / Pauline J.M.N., Achary A. // *Acta Protozool.* – 2019. – № 58. – С. 31–41. <https://doi.org/10.4467/16890027AP.19.003.10834>
21. Pittman J.K., Dean A.P., Osudenko O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources / Pittman J.K., Dean A.P., Osudenko O. // *Bioresour Technol.* – 2011. – № 102. – С. 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.035>
22. Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon dioxide utilization using *Chlorella* microalgae / Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. // *Environments*. – 2023. – № 10(7). – С. 109. <https://doi.org/10.3390/environments10070109>
23. Sathasivam R., Radhakrishnan R., Hashem A., Abd Allah E.F. Microalgae metabolites: a rich source for food and medicine / Sathasivam R., Radhakrishnan R., Hashem A., Abd Allah E.F. // *Saudi J Biol Sci.* – 2019. – № 26. – С. 709–722. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.003>
24. Sharma J., Kumar V., Kumar S.S., Malyan S.K., Mathimani T., Bishnoi N.R., Pugazhendhi A. Microalgal consortia for municipal wastewater treatment – lipid augmentation and fatty acid profiling for biodiesel production / Sharma J., Kumar V., Kumar S.S., Malyan S.K., Mathimani T., Bishnoi N.R., Pugazhendhi A. // *J Photochem Photobiol B Biol.* – 2020. – № 202. – С. 111638. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111638>
25. Singh S.P., Singh P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: A review / Singh S.P., Singh P. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – № 38. – С. 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.043>
26. Sonkar S., Mallick N. Development of a single-phase nitrate feeding strategy for enhanced lipid productivity from green microalgae for biodiesel production / Sonkar S., Mallick N. // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2017. – № 36(1). – С. 222–231. <https://doi.org/10.1002/EP.12443>
27. Toumi A., Politaeva N.A. Impact of the nitrate concentration on the biomass growth and the fatty acid profiles of microalgae *Chlorella sorokiniana* / Toumi A., Politaeva N.A. // *IOP Conference Series*:
-

Earth and Environmental Science. – 2021. – № 689. – С. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/689/1/012026>

28. *Tripathi S., Choudhary S., Meena A., Poluri K.M.* Carbon capture, storage, and usage with microalgae: A Review / *Tripathi S., Choudhary S., Meena A., Poluri K.M.* // *Environmental Chemistry Letters*. – 2023. – № 21(4). – С. 2085–2128. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01609-y>
29. *Wang L, Ji B, Hu Y, Liu R, Sun W. Wang L., Ji B., Hu Y., Liu R., Sun W.* A review on in situ phytoremediation of mine tailings / *Wang L., Ji B., Hu Y., Liu R., Sun W.* // *Chemosphere*. – 2017. – № 184. – С. 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>

Ботаника

Ложкина-Гамецкая Н.И., кандидат биологических наук, доцент

*Моисеева Е.А., кандидат биологических наук, старший преподаватель
(Сургутский государственный педагогический университет)*

*Бордей Р.Х., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
(Сургутский государственный университет)*

УДК 581.522.4:581.543.2.3.4

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОИ СОРТА «СК АРТИКА», ИНТРОДУЦИРОВАННОЙ В РАЗЛИЧНЫЕ ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Актуальность и цели. В статье представлены результаты изучения сравнительной оценки биологических особенностей сои сорта «СК Артика» интродуцированного в различные почвенно-климатические условия средней тайги Западной Сибири и центрального Нечерноземья. Впервые проведена сравнительная оценка биологических особенностей сои сорта «СК Артика», выявлены особенности онтогенеза и биоморфологические признаки, приведены результаты кормовой оценки и продуктивности, установлена возможность возделывания сои на корм в экстремальных почвенно-климатических условиях ХМАО-Югры. Материалы и методы. Исследования по изучению оценки биологических особенностей сои сорта «СК Артика», проводились на базе ботанического сада Сургутского государственного университета ХМАО-Югры. Объектом изучения является однолетняя бобовая культура соя, сорта «СК Артика». Результаты. Впервые проведена оценка эколого-биологических особенностей сои сорта «СК Артика» интродуцированной в средней тайге Западной Сибири и центрального Нечерноземья (по литературным источникам). Выявлены особенности экологии, онтогенеза и биоморфологические признаки, приведены результаты кормовой оценки и продуктивности сои. Установлено, что за счёт удлинения виргинильного периода интродуцента отмечен высокий сбор зелёной массы. Высота стеблестоя интродуцента и урожайность существенно не отличались от аналогичных изучаемых показателей сортов сои северного экотипа, возделываемых в почвенно-климатических условиях г. Брянска. Зафиксировано, что наступление генеративной фазы проходит при более низкой сумме активных температур воздуха (763 °С) в отличие от г. Брянска (2150–2300 °С) за вегетационный период. Однако, при этом наблюдается выпадение фазы периода восковой и полной спелости бобов.

Ключевые слова: сорта северного экотипа, соя, сорта «СК Артика», ХМАО-Югра, Брянская область, интродукция, почвенно-климатические условия.

Lozhkina-Gametskaya N.I.

Moiseeva E.A.

Bordey R.Kh.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SOYBEAN VARIETY «SK ARTIKA» INTRODUCED INTO VARIOUS SOIL AND CLIMATIC CONDITIONS

Relevance and goals. The article presents the results of a study of the comparative assessment of the biological characteristics of soybeans of the «SK Artika» variety introduced into various soil and climatic conditions of the middle taiga of Western Siberia and the central Non-Chernozem region. For the first time, a

comparative assessment of the biological characteristics of soybeans of the «SK Artika» variety was carried out, the features of ontogenesis and biomorphological signs were revealed, the results of feed assessment and productivity were presented, the possibility of cultivating soybeans for feed in extreme soil and climatic conditions of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug and the temperate continental climate of the Bryansk region was established. Materials and methods. Studies on the assessment of the biological characteristics of soybeans of the «SK Artika» variety were conducted on the basis of the Botanical garden of the Surgut State University of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. The object of study is an annual soybean bean crop, a variety of «SK Artika». Results. For the first time, an assessment of the ecological and biological characteristics of soybean of the «SK Artika» variety introduced in the middle taiga of Western Siberia and the central Non-Chernozem region was carried out (according to literary sources). The features of ecology, ontogenesis and biomorphological features are revealed, the results of feed assessment and soybean productivity are presented. It was found that due to the lengthening of the virginal period of the introducer, a high collection of green mass was noted. The height of the introduced stem and yield did not differ significantly from similar studied indicators of soybean varieties of the northern ecotype cultivated in the soil and climatic conditions of Bryansk. It was recorded that the onset of the generative phase takes place at a lower sum of active air temperatures (763 °C), unlike in Bryansk (2150–2300 °C) during the growing season. However, at the same time, there is a loss of the phase of the period of waxy and full ripeness of the beans.

Keywords: varieties of the northern ecotype, soy, variety «SK Artika», KhMAO-Yugra, Bryansk region, introduction, soil and climatic conditions.

Введение

Соя – является одной из наиболее распространенных белково-масличных культур в мире. Обладая адаптивностью к различным условиям, выращивания может произрастать на всех континентах нашей планеты, кроме Антарктиды. В таёжной зоне Западной Сибири и центральной зоне Восточно-Европейской равнины соя пока относится к малораспространенным культурам [2]. Так, ограничивающими факторами для выращивания сои в условиях Нечерноземной зоны являются достаточно продолжительный вегетационный период культуры, а также недостаточное количество тепла и влаги в период налива и созревания семян. Нижний порог активных среднесуточных температур для роста и развития растений сои составляет 15– 17 ° С, критическим периодом является цветение и образование бобов. Ареал распространения сои ограничивается суммой активных температур и датой наступления первого заморозка [3].

Исторически соя не возделывалась в таёжной зоне Западной Сибири и Нечерноземной зоне России что требовалось провести исследования по интродукции этой культуры в условиях данных зон. Реализация биологического потенциала продуктивности сои зависит от уровня адаптации сорта к неблагоприятным климата-географическим условиям, а также температуры, условия влагообеспеченности и светового режима.

Одним из возможных способов для разработки стратегии развития растениеводства на северных пределах земледелия и обогащения малопродуктивных сенокосно-пастбищных угодий может стать интродукция в регион новых высокобелковых кормовых культивируемых культур, характеризующих широким эколого-биологическим потенциалом и высокими кормовыми достоинствами [8]. Большой интерес, по нашему мнению, в настоящее время вызывает уникальная по биологическим особенностям, перспективная сельскохозяйственная культура соя (*Glycine max*. L.) являющаяся одной из важнейших белково масличных культур в мировом земледелии [1]. В РФ к концу 2022 года посевные площади под сою достигли 3,4 млн. га с перспективой на увеличение площадей соевосаждения до 5 млн. га [4]. Ценность данной культуры определяется высоким содержанием перевариваемого белка, витаминов, особенно каротином, кормовых единиц, содержанию фосфора, кальция по сравнению с другими бобовыми культурами. Не стоит забывать, что проблема органического вещества в почвах является одной из основных проблем лимитирующих возделывание кормовых трав в регионе. Соя, как бобовая культура, может стать одним из элементов биологического земледелия для восстановления и улучшения низкопло-

дородных кислых подзолистых почв [11]. В настоящее время соя возделывается в более чем 20 регионах России [6, 11]. В процессе вегетации культурные растения, особенно в условиях умеренных и северных широт, часто подвергаются влиянию различных стрессоров.

Проблема расширения ассортимента бобовых культур в ХМАО-Югре является весьма актуальной задачей и решению данного вопроса большая роль отводится ботаническим садам [17]. Исследования направленные на изучение перспективности и успешности интродукции новой для округа культуры сои могут стать не только крупным резервом пополнения ресурсов полноценного растительного белка, но будут способствовать разработке адаптивных технологий возделывания сои культурной и созданию прочной кормовой базы.

Цель работы – изучить эколого-биологические особенности сои северного экотипа сорта «СК Артика» интродуцированной в экстремальных почвенно-климатических условиях г. Сургута и дать сравнительную оценку сортов сои северного экотипа возделываемой в почвенно-климатических условия г. Брянска.

Материалы и методы

Полевой опыт по оценке биологических особенностей сои сорта «СК Артика» интродуцированной в средней тайге Западной Сибири проводился на базе ботанического сада Сургутского государственного университета ХМАО-Югры.

Объектом исследования послужила однолетняя бобовая культура соя, сорта «СК Артика». Оригинатором сорта является ООО Компания «СОКО», авторы сорта – А.В. Кочегура и А.В. Щегольков. Подвид маньчжурский (*spp. Manshurica*), разновидность скороспелая (var. *praesox Enk*). Данный сорт характеризуется пластичностью, высокой устойчивостью к растрескиванию и полеганию с повышенным содержанием протеина в семени от 41 до 43 %, масла – от 21 до 23 %. Тип роста растений – полудетерминантный, со средней высотой надземных побегов, ветвистость пониженная, угол отхождения от главного стебля острый, опушение растений – серое, высота прикрепления нижнего боба – 12–14 см, венчик цветка – белый. Вегетационный период в зависимости от зоны возделывания составляет от 80 до 110 дней, урожайность – от 2,16 до 3,82 т/га. Сумма эффективных температур для созревания семян варьирует в пределах 1750–1850 °С. Регионы возможного соесяния от 44 до 55 °с.ш. без десикации. Соя сорта «СК Артика» включен в Госреестер для возделывания в Восточно-Сибирском, Западно-Сибирском, Уральском, Средневолжском, Северно-Кавказском, Центральном-Черноземском, Волго-Вятском и Центральном регионах. Также рекомендован для возделывания в Брянской, Тульской и Курганской области; Краснодарском и Красноярском краях. Семенной материал для интродукционных испытаний получен из ООО Компании «СОКО» (г. Краснодар).

В г. Сургуте интродукционное изучение сои культурной сорта «СК Артика» проводили по методике Б. А. Доспехова [1958] методом рандимизированных организованных повторений в 3-х кратной повторности. Площадь учетной делянки – 1,5 м². Схема опыта включала: контроль (посев сухих семян) и предпосевная бактериализация семян сои препаратом «ХайКоут Супер Соя». Посев сои проводили ручным способом в июне 2023 года. Дополнительное внесение минеральных удобрений не производилось. Прополку и уборку сои проводили ручным способом.

С целью выявления отношения сои к экологическим условиям пункта интродукции расчет гидротермического коэффициента (далее ГТК), фенологические наблюдения, учет ассимиляционной поверхности растений, оценку и учет урожайности, кормовую оценку проводили по общепринятым методикам [14, 15, 12, 5]. Определение химического состава растительных проб, отобранных в конце вегетации проведён в аккредитованной агрохимической лаборатории г. Йошкар-Олы.

Результаты и обсуждение

В литературных источниках нет данных по сое сорта «СК Артика», только в Брянской области авторы Зайцева О.А., Бельченко С.А., Дронов А.В., Сычев С.М., Дьяченко В.В., Малявко Г.П.

провели сравнительную оценку зерновой продуктивности и адаптивности сортов сои в агроклиматических условиях Брянской области. Результаты свидетельствуют, что данный сорт сои «СК Артика» дал хорошую динамику устойчивости к агроклиматическим условиям г. Брянска. Авторами был заложен интродукционный опыт по методике Б. А. Доспехова. Технология возделывания зернобобовых культур общепринятая, которая включала предпосевную обработку почвы минеральным удобрением в виде азофоски. Так, почвенный покров Брянской области отличаются от почв ХМАО-Югры, который представлен дерново-среднеподзолистыми легкосуглинистыми почвами, содержание гумуса 2,2%, рН KCl – 5,6-5,8, содержание подвижного фосфора 220,0 мг/кг, обменного калия – 172,3 мг/кг [3]. Почвенный покров ХМАО-Югры – песчаные, подзолистые, кислые (рН = 5,2) с содержанием гумуса 5,6 % (по Тюрину), аммонийного азота 3,9 мг/кг почвы (по ЦИНАО), нитратного азота 129 мг/кг почвы (ионометрический метод), подвижных форм фосфора – 396 мг/кг почвы и обменного калия – 67 мг/кг почвы (по Кирсанову).

Районы интродуцированного исследования расположены: в ХМАО-Югра, в центральной части Западно-Сибирской равнины на правом берегу р. Обь относящийся к 3 агроклиматическому району [16, 19]. Характеризуется континентально-циклоническим типом климата [2] с недостаточной теплообеспеченностью и избыточным переувлажнением [18]; район, расположенный в Брянской области на северо-западе Центрального Нечерноземья занимающий правобережье р. Десны, относится к 1 агроклиматическому району в формировании устойчивой и стабильной урожайности [6]. Характеризуется умеренно-континентальным типом климата [13] с достаточным увлажнением и относительно теплым летом [13].

Гидротермический режим для вегетационного периода сои в г. Сургуте был типичным для района (рис. 1)

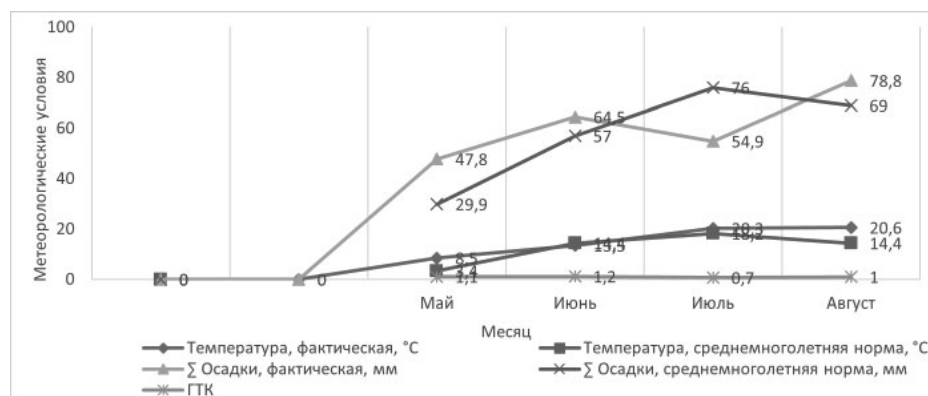


Рис. 1. Гидротермический режим вегетационного сезона по данным станции г. Сургута, 2023 г.

Сложившиеся погодные условия в г. Сургуте за исследуемый период отличались значительным переувлажнением и повышением температуры воздуха на 3°С относительно среднемноголетних значений. Количество влаги выпавших в виде атмосферных осадков превышала среднемноголетний показатель на 13,6 мм. При этом в мае отмечен переизбыток поступления влаги на 18 мм и увеличением среднесуточной температуры воздуха на 5 °С (ГТК = 1,1). Необходимо отметить, что в мае месяце в ночное время наблюдалось понижение температуры воздуха до -6°С. Сложившиеся погодные условия в г. Брянске значительно отличались за исследуемый период переувлажнением и повышением температуры воздуха на 6,4°С относительно среднемноголетних значений (рис. 2).

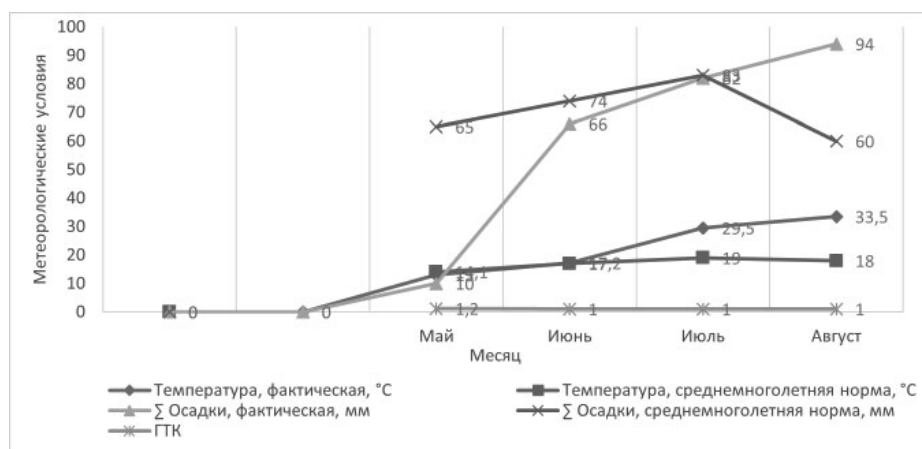


Рис. 2. Гидротермический режим вегетационного сезона по данным станции г. Брянска, 2023 г.

Количество влаги выпавших в виде атмосферных осадков превышала среднегодовой показатель на 30 мм. При этом в мае отмечен переизбыток поступления влаги на 55 мм (ГТК = 1,2), когда производился посев сои. Заметим, что избыточное поступление влаги является крайне неблагоприятным погодным условием для сои. Почва была переувлажненной, что привело к торможению ростовых процессов растений сои. Температура воздуха в ночное время понижалась до 5-8 °С. Температурный режим на исследуемом участке г. Сургуте в июне месяце, когда производился посев сои, существенно не отличался от среднегодовых значений, но наблюдалось незначительное переувлажнение. Температура воздуха в ночное время понижалась до 2–5 °С. (ГТК = 1,2), т.е. показатели по гидротермическому режиму с теми, что характерны для г. Брянска, близки – ГТК = 1. Наиболее засушливым характеризовался июль месяц в г. Сургуте, в период активного роста, развития и формирования вегетативной массы сои. Коэффициент увлажнения составил 0,7, в отличие от г. Брянска, где среднесуточная температура воздуха увеличилась на 10,5 °С., а ГТК = 1. Период развития генеративных органов растений сои приходился на август месяц при сумме активных температур воздуха (≥ 10 °С) 763 °С в г. Сургуте и от 2150 до 2300 °С в г. Брянске [9], ГТК за изучаемый период составил 1,0. В этом месяце наблюдалось превышение температуры воздуха на 6 °С в г. Сургуте и 15,5 °С в г. Брянске. Выпавших осадков на 9 мм от среднегодового показателя в г. Сургуте и 34 мм в г. Брянске. Продолжительность вегетационных периодов развития интродуцентов в экстремальных почвенно-климатических условиях пункта интродукции является одним из лимитирующих показателей для возделывания сои.

Анализ изучения межфазных периодов роста и развития растений сои показал, что в условиях пункта интродукции г. Сургута, в зависимости от варианта опыта, всходы появились через 15–20 суток после посева в первой декаде июля при посеве 21.06.2023, а в г. Брянске посев был проведен в первой декаде мая, всходы появились через 13–14 суток, что вполне закономерно, так как большое количество осадков в этот период было неблагоприятным для сои. Продолжительность периода «всходы – цветение» составила от 60 до 65 суток (с 4 июля по 17 августа) в г. Сургуте и 55–56 суток в г. Брянске. Окончание вегетационного периода и срезка вегетативной массы для проведения учетов и анализов пришлось на фазу формирования бобов, на стадии их зеленой спелости. В период восковой и полной спелости бобов растения сои сорта СК Артика в условиях г. Сургута не вступили в отличие от г. Брянска, что связано с поздними сроками сева данной культуры.

Инокуляция семян сои культурной перед посевом бактериальным препаратом «Хайкоут Супер Соя» ускорила наступление появления всходов на трое суток (4 июля), а межфазного периода всходы– полное цветение – на пять дней (10 августа).

В результате наших исследований в условиях интродукции высота надземных побегов растений сои к концу вегетационного периода, в среднем по трем закладкам опыта в зависимости от варианта опыта, варьировала от $31 \pm 1,15$ ($V=1,15$) до $86 \pm 1,15$ ($V=2,05$) см (рис. 3).



Рис. 3. Показатели надземных побегов сои сорта «СК Артика» г. Сургут, 2023 г.

Коэффициент вариации высоты растений сои в г. Брянске, отражает низкую урожайность по годам и низкий уровень изменчивости с наименьшим варьированием ($V=22,6\%$) [9], что связано с уровнем плодородия почвы.

Также установлено, что в г. Сургуте высота надземных побегов сои сорта «СК Артика» в конце вегетационного периода существенно не отличалась от идентичного показателя сои северного экотипа, возделываемой в условиях г. Брянска, где она составляла 86,5 см, в то время как в наших условиях варьировала от 31 до 86 см.

Анализ биометрических показателей листового ряда стеблей сои в среднем по трем закладкам опыта показал, что одно растение формирует от $4,5 \pm 0,36$ ($V=20,5$) до $7,5 \pm 0,28$ ($V=19,3$) листочков, шириной от $4,9 \pm 0,4$ ($V=27,1$) до $8,2 \pm 0,59$ ($V=23,1$) см и длиной от $2,8 \pm 0,27$ ($V=33,4$) до $4,2 \pm 0,31$ ($V=23,2$) см. Наибольшая площадь листовой поверхности формировалась в фазу плодообразования. От $7 \pm 0,82$ ($V=15,2$) до $15 \pm 1,3$ ($V=18,3$) штук соцветий и от $3 \pm 0,95$ ($V=17,4$) до $18 \pm 1,2$ ($V=21,4$) штук бобиков, длиной от $1,8 \pm 0,43$ ($V=27,7$) до $2,41 \pm 0,32$ ($V=37,5$) см (рис. 4, 5).

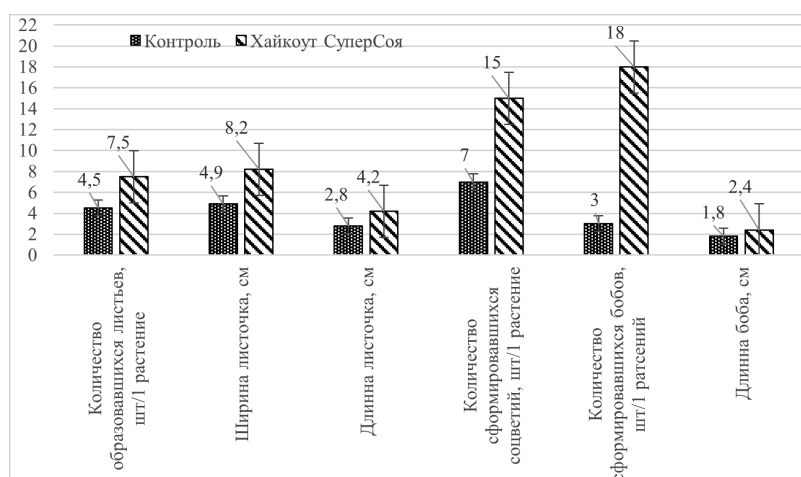


Рис. 4. Морфометрические показатели надземного побега сои культурной сорта «СК Артика» по вариантам опыта, 2023



Рис. 5. Соя сорта «СК Артика» в условиях интродукции, конец вегетации 2023 год.
Вариант опыта: А – Контроль; Б – Инокуляция ХайКоут Супер Соя

Анализ морфометрических показателей растений сои культурной в условиях пункта, в среднем по трем закладкам опыта интродукции г. Сургута, показал целесообразность применения бактеризации семян препаратом «ХайКоут Супер Соя» для инокуляции посевного материала в сравнение с контролем. К концу вегетационного периода высота надземных побегов в данных вариантах опыта составила 77–86 см, что достоверно превышала ($p \leq 0,05$) контрольные показатели на 56–64 %. Растения контрольного варианта опыта уступали по всем остальным изучаемым параметрам в 1,5–2 раза, а по количеству сформировавшихся бобов – в 6 раз.

Для учета продуктивности зеленой массы сои в конце вегетационного периода, в среднем по трем закладкам опыта, показал значительное преимущество бактеризации семян сои культурной сорта «СК Артика» препаратом «Хайкоут Супер Соя» в сравнении с контрольными показателями (табл. 1).

Таблица 1

**Продуктивность зеленой массы сои культурной, «СК Артика», и ее элементов
в условиях интродукции, конец вегетации г. Сургут, 2023 г.**

Наименование показателя	Контроль	«Хайкоут Супер Соя»
Сырая масса 1 стебля, г	1,6	4,1
Сырая масса листьев	1,8	5,1
Облиствененность, %	53,0	56,5
Сырая масса бобов, г	0,2	0,4
Продуктивность ЗМ 1 растения, г	2,5	9,6
Зеленая масса, ц/га	12,4	106,6
Воздушно-сухая массы, ц/га	5,2	33,9
Абсолютно сухое вещество, ц/га	4,8	33,4
Сбор с 1 га кор. ед	4,4	30,4
Сбор с 1 га перевариваемого протеина	0,5	2,4

В фазу плодообразования в конце вегетационного периода сои максимальный сбор зеленой массы и сухого вещества получен в варианте с бактеризацией семян сои. Так, в данном варианте опыта, в среднем по трем закладкам опыта, продуктивность зеленой массы одного растения была выше контрольных экземпляров на 3,8 %, а сбор сырой зеленой массы – на 8,6 % ц/га и абсолютно сухого вещества на 7 % ц/га. Наибольший сбор кормовых единиц и перевариваемого протеина с 1 га также получены в варианте с применением «Хайкоут Супер Соя» для инокуляции сои перед посевом. Сравнительная оценка продуктивности зелёной массы сои, выращенной в экстремальных почвенно- климатических условиях г. Сургута показала, что не смотря на поздние сроки сева существенно не отличаются от урожайности сои северного экотипа возделываемых от сои в г. Брянске, которая составила 21,9 ц/га. По нашему мнению, это связано с удлинением виргинильного периода роста и развития сои в условиях севера, когда происходит интенсивное накопление вегетативной массы интродуцента.

Заключение

Таким образом, впервые проведена оценка эколого-биологических особенностей сои сорта «СК Артика» интродуцированной в средней тайге Западной Сибири и центрального Нечерноземья (по литературным источникам). Выявлены особенности экологии, онтогенеза и биоморфологические признаки, приведены результаты кормовой оценки и продуктивности сои. Установлено, что за счёт удлинения вергинильного периода интродуцента отмечен высокий сбор зелёной массы. Высота стеблестоя интродуцента и урожайность существенно не отличались от аналогичных изучаемых показателей сортов сои северного экотипа, возделываемых в почвенно-климатических условиях г. Брянска. Зафиксировано, что наступление генеративной фазы проходит при более низкой сумме активных температур воздуха (763 °С) в отличие от г. Брянска (2150-2300 °С) за вегетационный период. Однако, при этом наблюдается выпадение фазы периода восковой и полной спелости бобов.

В целом, результаты наших исследований свидетельствуют, что соя сорта «СК Артика» относящийся к северному экотипу характеризуется широкой экологической пластичностью и может быть перспективной для возделывания на корм в экстремальных почвенно-климатических условиях средней Тайги Западной Сибири, что определяет необходимость проведения дальнейших исследований с целью разработки адаптивной технологии её возделывания.

Для цитирования: Ложкина-Гамецкая Н.И., Моисеева Е.А., Бордей Р.Х. Сравнительная оценка биологических особенностей сои сорта «СК Артика» интродуцированной в различные почвенно-климатические условия // Естественные и технические науки. 2024. № 8. С.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Департамента образования и молодежной политики ХМАО-Югры «Формирование и изучение живых биоресурсных коллекций для сохранения биоразнообразия и обеспечения комфортной среды обитания человека в условиях севера Западной Сибири» проект № 10-П-1534.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов А.С., Васильчиков А.Г. Адаптивная технология возделывания сои // Зернобобовые и крупяные культуры» 2014. № 4 (12). С. 108–113.
2. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа. Т. 2: Природа. Экология / Правительство Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [редкол.: Филипенко А.В. и др.]. Ханты-Мансийск; М., 2004. 152 с.

3. Бельшикина М.Е, Кобозева Т.П., Гуреева Е.В. Рост и развитие сортов сои северного экотипа в зависимости от влияния лимитирующих факторов вегетационного периода // Аграрный научный журнал. 2020. № 9. С. 4–9.
4. Горгулько Т.В., Дидович С.В., Пась А.Н. Влияние штаммов клубеньковых бактерий на эффективность бобоворизобиального симбиоза у сортов сои // Общее земледелие и растениеводство. 2023. Т. 1, № 2. С. 32–37.
5. Дорохов А.С., Бельшикина М.Е. Агроклиматическая характеристика регионов Нечерноземной зоны Российской Федерации и оценка пригодности для возделывания современных раннеспелых сортов сои // Вестник Ульяновской ГСХА. 2021. № 3 (55). С. 34–39. doi: 10.18286/1816-4501-2021-3-34-39.
6. Дорохова А.С., Бельшикина М.Е., Большева К.К. Производство сои в Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3. С. 25–33. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) Москва : Агропромиздательство. 1985. 351 с.
7. Жученко А.А. Адаптивная система селекции растений (эколого-ценотические основы). М. 2001. Т. 1–2. 779 с.
8. Зайцева О.А., Бельченко С.А., Дронов А.В., Сычев С.М., Дьяченко В.В., Малявко Г.П. Сравнительная оценка зерновой продуктивности и адаптивности сортов сои в агроклиматических условиях брянской области // Зернобобовые и крупяные культуры № 4 (44) 2022 г. С.40–48.
9. Козлова Е.И., Новак М.А., Яндьо В.В. Региональные аспекты развития рынка сои на современном этапе // Вестник Воронежского аграрного университета. 2023. Т. 16, № 1(76). С. 213–220.
10. Мустафаев, З.Х. Роль минеральных удобрений в повышении биологической активности азота на зерновых ризоценозах в условиях Малого Кавказа// Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4, № 3. С. 75–82. doi:10.5281/zenodo.1197998.
11. Ничипорович А.А. Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности / А.А. Ничипорович. М. : «Наука», 1966. 50 с.
12. Природа и природные ресурсы Брянской области. Монография / Под ред. Л.М. Ахромеева. Брянск: Изд-во «Курсив», 2012. 320 с.
13. Работнов Т.А. Работы в области изучения жизненного цикла многолетних травянистых растений в естественных ценозах // Вопросы ботаники. М. – Л. : Изд-во АН СССР. 1954. Вып. 2. С. 653–675.
14. Селиванов Г.Т. Происхождение и динамика засух / Г.Т. Селиванов. В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л. : Гидрометеиздат. 1958. С. 5–30.
15. Сергеев Г.М. Агроклиматические ресурсы лесной зоны Западно-Сибирской равнины / Г.М. Сергеев. Иркутск : Вост.-сиб. кн. изд., 1972. 86 с.
16. Ткаченко К.Г. 2018. Ботанические сады – центры испытания новых видов растений для городского озеленения. В сб.: Урбозкосистемы: проблемы и перспективы развития: материалы VI Международной научно-практической конференции. Ишим. С. 137–138.
17. Физическая география и экология региона / под ред. В.И. Булатова, Б.П. Ткачёва. Ханты-Мансийск: Информ.–изд. Центр, 2006. 196 с.
18. Экология Ханты-Мансийского автономного округа / под ред. В.В. Плотникова. Тюмень. 1997. 288 с.

Руденко И.В., преподаватель
(Кубанский государственный университет);

соискатель
(Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина)

Пикалова Н.А., кандидат биологических наук, доцент
(Кубанский государственный университет)

Криворотов С.Б., доктор биологических наук, профессор
(Кубанский государственный университет);

зав. кафедрой
(Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина)

УДК 581.95

НОВЫЕ И РЕДКО ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ ВИДЫ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ Х. ИЛЫЧ (ОТРАДНЕНСКИЙ РАЙОН)

В статье обсуждаются находки новых и редких видов сосудистых растений, обнаруженных в окрестностях х. Ильич (Отраденский район Краснодарского края), а также приводится численность и распространение охраняемых таксонов. Исследования проводились в 2022 и в 2024 гг. в междуречье р. Уруп и р. Кува от х. Ильич до административной границы Карачаево-Черкесской Республики. Выявлено 27 видов сосудистых растений, внесённых в Красную книгу Краснодарского края. Из них 10 видов для Отраденского района описаны впервые, в том числе находящийся в критическом состоянии (1 КС) эндемик Кавказа *Scrophularia chrysantha* [1]. Также выявлено 4 редких для флоры Краснодарского края таксона без охранного статуса, которые ранее не фиксировались в Отраденском районе.

Ключевые слова: Отраденский район, редкие растения, Красная книга, памятник природы, Чалмыкско-Кубанский флористический район, Западный Кавказ, флористические находки.

Rudenko I.V.
Pikalova N.A.
Krivorotov S.B.

NEW AND RARE VASCULAR PLANT SPECIES ON THE KRASNODAR TERRITORY IN KHUTOR ILYICH VICINITY (OTRADNENSKY DISTRICT)

*Abstract: The article is devoted to discussion of findings of new and rare vascular plant species in Khutor Ilyich vicinity (Otradnensky district of Krasnodar Territory). The number and distribution of protected taxa are given in the present work. The research was carried out in 2022 and in 2024 in the interfluvium of the Urup and the Kuva rivers from Khutor Ilyich to the administrative border of Karachay-Cherkess Republic. As a result, 27 vascular plant species, listed in the Red Book of Krasnodar Territory, have been identified. 10 species have been described for the first time in Otradnensky district, including the critically endangered (1 CC) Caucasian endemic *Scrophularia chrysantha*. Also 4 taxa that are rare for the flora of Krasnodar Territory were identified*

without a protected status and which had not previously been recorded in Otradnensky district.

Keywords: *Otradnensky district, rare plants, Red Book, natural monument, Chalmyk-Kuban floristic district, Western Caucasus, floristic finds, Belo-Labinsk floristic district*

Введение. Территория проведения исследований является уникальной, мало изученной ввиду сложного рельефа, отдаленности района, отсутствия доступных транспортных развязок. Отрадненский район расположен в юго-восточной части Краснодарского края в северных предгорьях Главного Кавказского хребта, он является одним из самых удаленных районов Кубани. Район разместился в долинах рек Уруп, Большой и Малый Тегинь. Рельеф района смешанный: от равнинного на севере до холмисто-предгорного и горного к югу. Высота над уровнем моря от 300 до 1500 м. Климат – умеренно-континентальный, характеризуется незначительными перепадами температур (средняя температура летом +22 °С, зимой -10° С), в течение года преобладает ясная погода (около 80 % солнечных дней). Среднегодовое количество осадков колеблется от 560 до 770 мм, из них в летний период выпадает 440-640 мм. Засушливый период приходится на конец мая, август и сентябрь.

Методы и материалы. Исследования проводились с мая по август в 2022 и 2024 гг. Северной границей района проведения исследований служит х. Ильич, южной – административная граница между Краснодарским краем и Карачаево-Черкесской Республикой (рис. 1). На востоке изучены территории до р. Кува, на западе граница проходит по р. Уруп. Данный район находится на отрогах Скалистого хребта в среднегорном поясе. Вдоль р. Кува располагается памятник природы регионального значения «Кувинское ущелье» [3]. В результате проведенного флористического исследования выявлено несколько редких видов растений, ранее не указанных для данной территории. При подготовке статьи использованы материалы онлайн-ресурсов «Плантариум» (www.plantarium.ru) и iNaturalist (www.inaturalist.org/observations/).



а



б

Рис. 1. Район исследования: *а – правый берег р. Уруп (здесь и далее – фото авторов); б – положение района исследования на карте*

Результаты. В ходе проведенных исследований выявлено и описано 27 видов растений, занесённых в Красную книгу Краснодарского края (КК) и Российской Федерации (РФ), из которых

10 отмечены впервые для Отрадненского района. Также выявлено 4 редких для Краснодарского края вида без охранного статуса, которые ранее не описаны в Отрадненском районе [2].

Новые виды для флоры Бело-Лабинского флористического района Западного Кавказа и Отрадненского района Краснодарского края:

1. *Ephedra procera* Fisch. & С.А. Меу. – хвойник рослый, эфедра высокая: одна популяция на отвесном склоне над р. Уруп, правый берег, 9 особей, в 2 км от х. Ильич, рядом с балкой Собачьей, 9.VI 2024, 706 м н. ур. м., 44°4'5.016» N 41°20'27.528» E. В «Конспекте флоры Кавказа» не указан [3]. А.С. Зернов отмечает на скалах и каменистых склонах Джегутинского, Архызского, Учкуланского флористических районов (фл. р-нов) Карачаево-Черкесии [4-5]. На территории Краснодарского края ранее не фиксировался. Включён в Красную книгу Чеченской Республики (3 – редкий вид), отмечен в Приэльбрусье, на Центральном Кавказе и в Дагестане [6].

2. *Epipactis persica* (Soó) Hausskn. ex Nannf. – дремлик персидский: 1) левый берег р. Кува от г. Громатуг по балке Гамовской до Можжевельного мыса, буковые и буко-грабовые сообщества, 12 генеративных особей, 24.VI 2024, 1123 м н. ур. м., 44°1'51.492» N 41°18'51.732» E; 2) 1 генеративная особь на правом берегу р. Уруп в 2 км от х. Ильич, рядом с каменистым склоном в буковом сообществе, 24.VI 2024, 678 м н. ур. м., 44°4'0.912» N, 41°20'24.432» E. Ранее описан в Крыму, Карачаево-Черкесии, Адыгее и Дагестане без указания места произрастания [7], для Краснодарского края выявлен в окр. Геленджика, где также описан новый вид *Epipactis euxina* Fateryga, Popovich & Kreutz, близкий *Epipactis persica* [8]. В «Конспекте флоры Кавказа» указан только для Восточного и Южного Закавказья, для Западного Кавказа и Краснодарского края не описан [3]. Отсутствует в работах А.С. Зернова [4-5]. С.А. Литвинской [9] на Западном Кавказе указан только для Уруп-Тебердинского фл. р-на, в Карачаево-Черкесии, в Теберде, р. Малая Хатипара. Впервые фиксируется для Отрадненского р-на. Включён в Красную книгу Крыма (3 – редкий вид) и Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [10].

3. *Lonicera steveniana* Fisch. ex Rojark. – жимолость Стевена: 1) 1 плодоносящая особь, левый берег р. Кува, место впадения р. Бардачка, скальные выступы, 6.VIII 2022, 736 м н. ур. м., 44°4'11.352» N 41°20'32.388» E.; 2) 7 плодоносящих особей, правый берег р. Уруп, от балки Трубной до балки Собачьей, буковые сообщества и скальные обнажения над р. Уруп, 23.VI 2024, 816 м н. ур. м., 44°3'13.536» N 41°22'5.772» E. А.С. Зернов отмечает на лесных опушках Краснодарского края, без указания мест произрастания, и в Карачаево-Черкесии, в Джегутинском, Архызском и Учкуланском фл. р-нах [4-5]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Уруп-Тебердинском и Верхнекубанском фл. р-нах, для Бело-Лабинского фл. р-на не указан [3]. Для Отрадненского р-на фиксируется впервые.

4. *Orthilia secunda* (L.) House – ортилия однобокая: 1 генеративная особь, левый берег р. Кува, мыс можжевельный, буковое сообщество с примесью тиса ягодного, 24.VI 2024, 998 м н. ур. м., 44°2'15.288» N 41°20'25.368» E. Широко распространён в Европе, средней полосе России и Сибири. Для Западного Кавказа А.С. Зернов отмечает в тенистых лесах Краснодарского края, без указания мест произрастания, и в Карачаево-Черкесии, в Архызском и Учкуланском фл. р-нах [4-5]. В «Конспекте флоры Кавказа» не указан [3]. Для Отрадненского р-на фиксируется впервые.

Новые виды для флоры Отрадненского района, внесённые в Красную книгу Краснодарского края и Российской Федерации:

1. *Dracosephalum ruyschiana* L. – змееголовник Рюйша: в разнотравных лугах на границе Краснодарского края и Карачаево-Черкесии, между балкой Хабакирова и балкой Гамовской, встречается обильно, более 500 генеративных особей, 24.VI 2024, 1269 м н. ур. м., 44°1'20.784» N 41°18'30.420» E. И.Н. Тимухин и Б.С. Туниев отмечают вид в Мостовском р-не, на хр. Герпегем, и в г. Сочи, на хр. Аишха и хр. Аибга-Ацетука [1]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

2. *Echium russicum* J.F. Gmel. – синяк русский: в разнотравных лугах на границе Краснодарского края и Карачаево-Черкесии, между балкой Хабакирова и балкой Гамовской, 3 генеративных особи на расстоянии 2 км, 24.VI 2024, 1221 м н. ур. м., 44°1'22.836» N 41°19'8.652» E. Для Краснодарского края отмечен в прибрежной зоне, в окр. г. Анапа, г. Новороссийск, ст. Тамань, и Мостовском р-не, хр. Герпегем и окр. х. Кизинка [1, 11]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

3. *Epipactis palustris* (L.) Crantz – дремлик болотный: под скальной осыпью, левый берег р. Кува, в 500 м от х. Ильич, 47 генеративных особей, 24.VI 2024, 725 м н. ур. м., 44°4'18.120» N 41°22'24.528» E. В Краснодарском крае описано 4 места произрастания: в окр. г. Новороссийска, г. Апшеронска, на хр. Герпегем и в заказнике «Камышанова поляна» [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинской [9] также отмечен для Уруп-Тебердинского фл. р-на, без указания мест произрастания, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, заказник «Камышанова поляна» и окр. базы «Серебряный ключ», Мостовском р-не, хр. Герпегем. Включён в Красную книгу КК (2 ИС), Европейский Красный список и Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [1].

4. *Equisetum hyemale* L. – хвощ зимующий: 1) обильно в пойме р. Уруп, более 3000 особей, отмечены участки площадью 100-150 м² с проективным покрытием ≈ 100 %, 7.VIII 2022, 673 м н. ур. м., 44°4'48.144» N 41°21'16.164» E; 2) в бассейне р. Кува, группами до 60 особей, всего не более 500 особей, 24.VI 2024, 791 м н. ур. м., 44°2'36.744» N 41°21'59.436» E. Отмечен для Хостинского, Лазаревского, Адлерского р-в г. Сочи, а также на р. Малая Лаба [1] и р. Кизинчи [11]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском фл. р-не без указания мест произрастания, для Уруп-Тебердинского фл. р-на не отмечен [3]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

5. *Monotropa hypopitys* L. – подъельник обыкновенный, вертляница обыкновенная: 1 генеративная особь в буко-тисовом сообществе, балка Гамовская, над можжевельным мысом, бассейн р. Кува, 24.VI 2024, 931 м н. ур. м., 44°2'18.708» N 41°20'28.752» E. Ареал разорванный, зафиксированы локальные популяции в Туапсе-Адлерском р-не, на хр. Маркотх [1]. Также зафиксировано 18 генеративных особей в окрестностях х. Бетта, в сосновых сообществах (данные авторов, 07.VI 2023), и 2 особи в Мостовском р-не, п. Никитино, балка Капустина, в пихтовом сообществе (данные авторов, 18.VI 2024). В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

6. *Orchis purpurea* Huds. – ятрышник пурпурный: 1) 14 генеративных особей, левый берег р. Кува, от р. Бардачка до балки Собачьей, буковые сообщества с примесью *Carpinus betulus* L. и *Corylus avellana* L., 9.V 2024, 1052 м н. ур. м., 44°2'50.568» N 41°21'32.940» E; 2) х. Ильич, ул. Кувинская, участок, буковое сообщество, 1 генеративная особь, 9.V 2024, 700 м н. ур. м., 44°4'41.376» N 41°22'28.884» E. В Краснодарском крае встречается в прибрежной зоне, от ст. Тамань до г. Сочи, а также в окр. г. Горячий Ключ, Абинском р-не, Апшеронском р-не, на территории заказника «Камышанова поляна». В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском фл. р-не, без указания мест произрастания, для Уруп-Тебердинского фл. р-на не указан [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, без указания мест произрастания, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, заказник «Камышанова поляна» и с. Тубы, Мостовском р-не, г. Большой Тхач. Включён в Красную книгу КК (3 УВ), Красную книгу РФ (3 БУ), Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) и Европейский Красный список (2011) [1-2].

7. *Ostrya carpinifolia* Scop. – хмелеграб обыкновенный: 1 генеративная особь на скальных обнажениях, балка Трубная, 200 м от р. Уруп, обнаружен Крыленко В.В. (<https://www.>

inaturalist.org/observations/226444701), 23.VI 2024, 791 м н. ур. м., 44°3'44.712»N 41°20'34.620»E. Спорадично распространённый вид, на Кавказе отмечен от Ставропольского края до Республики Чечня, для Краснодарского края описан в Туапсе-Адлерском р-не и Мостовском р-не, балка Капустина, хр. Герпегем [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. Включён в Красную книгу КК (2 ИС) и Красную книгу РФ (2 И) [1-2].

8. *Scrophularia chrysantha* Jaub. et Spach – норичник золотистый: 3 особи, из которых 1 генеративная, правый берег р. Уруп в 2 км от х. Ильич, рядом с каменистым склоном, в буковом сообществе, 10.V 2024, 688 м н. ур. м., 44°4'17.796» N 41°20'37.572» E. Эндемик Кавказа, описан для Краснодарского края только в Адлерском р-не, ущ. Ахцу, ущ. Шахгинском и на правом берегу р. Мзымта, также встречается единично в Республике Адыгея, г. Оштен и Каменное море, и в Карачаево-Черкесии, Тебердинский национальный парк [1]. Включён в Красную книгу КК (1 КС).

9. *Scrophularia variegata* ssp. *rupestris* (M. Bieb. ex Willd.) Grau – норичник скальный: 20 особей, скальные обнажения, правый берег р. Уруп, над балкой Собачьей, 23.VI 2024, 684 м н. ур. м., 44°3'55.368» N 41°20'24.900» E. В Краснодарском крае встречается от Анапы до Новороссийска, в Апшеронском р-не, окр. Хадыженска [1], Мостовском районе, х. Кизинка (данные авторов, 03.VII 2015) [11], а также на скальных обнажениях и осыпях от Карачаево-Черкесии до Дагестана [12]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

10. *Woodsia caucasica* (С.А.Мей.) J. Sm. – вудсия кавказская, вудсия ломкая: эндемик Кавказа, отмечен на скальных обнажениях группами до 40 особей, в ущельях бассейна р. Кува, от г. Громатуг по балке Хабакирова до можжевелевого мыса и балки Гамовской, всего не более 500 особей, 23.VI 2024, 1065 м н. ур. м., 44°1'44.724» N 41°18'43.380» E. В Краснодарском крае встречается г. Туапсе, г. Сочи и Мостовском р-не, хр. Малый Бамбак, правый берег р. Малая Лаба, с. Шедок [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

**Охраняемые виды, ранее выявленные
для Западного Кавказа и Отрадненского района:**

1. *Allium albidum* Fisch. ex Bieb. – лук беловатый, лук оголённый: правый берег р. Уруп, грот Балкон, открытая скальная площадка над Урупом площадью 100-150 м², 28 генеративных особей, 10.V 2024, 705 м н. ур. м., 44°4'4.693» N 41°20'27.421» E. Крымско-кавказский эндемик, кальцефильный вид, на территории Краснодарского края отмечен в Мостовском районе, хр. Герпегем и г. Шахан [1], х. Кизинка [11], в Успенском районе и на хр. Аибга-Ацетука [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Уруп-Тебердинском фл. р-не без указания мест произрастания, для Бело-Лабинского фл. р-на не приводится [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, Республика Карачаево-Черкесия, южный склон г. Баранаха, окр. г. Черкесск, Краснодарский край, Отрадненский и Успенский р-ны, балка Бей-Мурза, балка Плутова, ст. Удобная, с. Успенское, ст. Упорная, ст. Преградная, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Мостовском р-не, ст. Баговская, г. Малый Бамбак, с. Перевалка, пгт Псебай, хр. Герпегем, г. Шахан, с. Солёное. В литературе популяция не описана, в Отрадненском р-не отмечается на территории памятника природы «Урупский», расположенном от ст. Отрадной до а. Урупский вдоль р. Уруп, правый берег [13]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

2. *Astragalus demetrii* Kharadze – астрагал Дмитрия: 1) правый берег р. Уруп, 700 м от места впадения р. Кува в р. Уруп, на скальной осыпи, 6 генеративных особей, 10.V 2024, 692 м н. ур. м., 44°4'17.688» N 41°20'55.320» E; 2) правый берег р. Уруп, грот Балкон, открытая скальная площадка над Урупом площадью 100-150 м², 36 генеративных особей, 10.V 2024, 735 м

н. ур. м., 44°4'6.240» N 41°20'28.824» E; 3) скальные обнажения, левый берег р. Кува, в 500 м от х. Ильич, 14 генеративных особей, 9.V 2024, 736 м н. ур. м., 44°4'19.236» N 41°22'23.700» E. Отмечен в Мостовском р-не, хр. Герпегем, г. Шахан, Успенском р-не, на правом берегу р. Уруп, Отрадненском р-не, на г. Громатуг и г. Баранаха [1]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

3. *Campanula pendula* Vieb. – колокольчик поникающий, колокольчик повислый: в 2022 г. авторами было описано две группы особей на правом берегу р. Уруп и правом берегу р. Кува, насчитывающие около 500 особей [14]. При детальном обследовании скальных обнажений в 2024 г. численность оказалась значительно выше: 1) правый берег р. Уруп от балки Собачьей до х. Ильич, в труднодоступных гротах проективное достигает 100 %, численность превышает 2000 особей, 7.VIII 2022, 727 м н. ур. м., 44°4'14.412» N 41°20'41.280» E; 2) бассейн р. Кува, правый берег, в ущельях на скальных обнажениях от грота «Мечта Должикова» по балке Хабакирова и балке Гамовской, вдоль р. Кува вплоть до х. Ильич, более 1000 особей 23.VI 2024, 1012 м н. ур. м., 44°2'15.864» N 41°20'17.160» E (рис. 2). Кальцефильный вид, описан в Мостовском р-не, окр. х. Кизинка [11], на хр. Герпегем, г. Шахан, Республике Адыгея [15], также распространён от Карачаево-Черкесии до Дагестана [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском фл. р-не, восточнее г. Фишт, и Уруп-Тебердинского фл. р-не без указания мест произрастания [3]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

4. *Cephalanthera damasonium* (Mill.) Druce – пыльцеголовник крупноцветковый: 1 особь в буковом сообществе между балкой Трубной и р. Кува, 9.V 2024, 981 м н. ур. м., 44°3'1.080» N 41°21'19.044» E. В Краснодарском крае встречается от Анапы до Сочи, в окр. г. Горячий Ключ, ст. Северской, г. Апшеронск и Мостовском р-не, балка Капустина [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] также отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, без указания мест произрастания, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, окр. Апшеронска, Мостовском р-не, балка Капустина. Для Отрадненского р-на отмечен на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» без указания численности [16], популяция в окр. х. Ильич ранее не описана. Включён в Красную книгу КК (3 УВ), Красную книгу РФ (3 БУ) и Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [1-2].

5. *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch – пыльцеголовник длиннолистный: 1 особь, буковое сообщество, слияние р. Бардачка и р. Кува, левый берег р. Кува, 9.V 2024, 922 м н. ур. м., 44°3'4.860» N 41°21'56.340» E. Широко распространён от Новороссийска до Сочи, а также в Северском, Абинском, Апшеронском р-нах Краснодарского края, Республике Адыгея [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, без указания мест произрастания, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, окр. г. Апшеронск, подножье г. Фишт, заказник «Камышанова поляна». Отмечен для памятника природы «Кувинское ущелье» без указания численности [17]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ) и Красную книгу РФ (3 БУ) [1-2].

6. *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. – пыльцеголовник красный: 34 единичных особи в буковом и буко-грабовом сообществах, от балки Шумелка до балки Собачьей, между р. Кува и р. Уруп, 23.VI 2024, 952 м н. ур. м., 44°2'18.312» N 41°20'26.196» E. Встречается в прибрежной зоне, от г. Новороссийск до г. Сочи, в Северском, Абинском, Апшеронском, Мостовском (хр. Герпегем, балка Капустина) р-нах Краснодарского края [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, Теберда и левый берег р. Уруп, у ст. Удобной, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, заказник «Камышанова поляна», р. Малая Лаба, Мостовском р-не, г. Большой Тхач, хр. Герпегем. В Отрадненском р-не отмечены популяции

на левом берегу р. Уруп, в окр. ст. Удобной [1], на территории памятника природы «Кувинское ущелье» [17] и памятника природы «Урупский» без указания численности [13]. Включён в Красную книгу КК (2 ИС), Красную книгу РФ (3 БУ) и Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [1-2].

7. *Dactylorhiza urvilleana* (Steud.) Н. Baumann et Kunkele – пальчатокоренник Дюрвиля: в разнотравных лугах, между балкой Хабакирова и балкой Гамовской, встречается обильно на всех разнотравных лугах между р. Уруп и р. Кува от г. Громатуг до х. Ильич, более 600 генеративных особей, 23.VI 2024, 1057 м н. ур. м., 44°2'37.320» N 41°20'12.156» E. В прибрежной зоне произрастает от г. Анапы до г. Новороссийска и от г. Туапсе до г. Сочи, также отмечен в Мостовском р-не, хр. Герпегем и балка Капустина [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, окр. ст. Передовая, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, заказник «Камышанова поляна», подножье г. Фишт, Мостовском р-не, г. Большой Тхач, хр. Герпегем. В Отрадненском р-не таксон отмечается также на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» и памятника природы «Урупский» без указания численности [13, 16]. В литературе исследованная популяция не описана. Включён в Красную книгу КК (4 СК).



а



б



в



г



д



е

Рис. 2. Редкие виды в окр. х. Ильич: а – астрагал Деметрия (*Astragalus demetrii*); б – ирис рогатый (*Iris furcata*); в – норичник золотистый (*Scrophularia chrysantha*), находящийся в критическом состоянии вид (1 КС); г – хвощ зимующий (*Equisetum hyemale*), пойма р. Уруп; д – колокольчик повислый (*Campanula pendula*); е – ятрышник шлемоносный (*Orchis militaris*)

8. *Galanthus alpinus* Sosn. – подснежник альпийский: исследования проводились после периода вегетации, отмечено 16 особей с плодами и остатками цветов, правый берег р. Уруп, балка Собачья, буковое сообщество, 7.V 2024, 686 м н. ур. м., 44°4'18.120» N 41°20'54.096» E. На территории Краснодарского края и Республики Адыгея отмечен от Геленджика до Мостовского р-на (хр. Герпегем) на восток и от Геленджика до Сочи на юг. В литературе популяция не описана, в Отрадненском р-не отмечается С.А. Литвинской на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» без указания численности [16]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ), Красную книгу РФ (3 У), Красный список МСОП и Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [1-2, 10].

9. *Gladiolus tenuis* Bieb. – шпажник тонкий: в разнотравных лугах и на границе лесных и луговых сообществ, от г. Громатуг, между балкой Хабакирова и балкой Гамовской, до балки Собачьей, встречается обильно, более 1000 генеративных особей, 23.VI 2024, 1213 м н. ур. м., 44°1'24.276» N 41°19'10.272» E. Произрастает от Анапы до Геленджика, в окр. г. Сочи, в бассейне р. Большая Лаба, на хр. Герпегем [1] и на г. Кизинчи [11]. В «Конспекте флоры Кавказа» отмечен для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, Республика Карачаево-Черкесия, г. Бараныха, Отрадненский р-н, окр. ст. Спокойной, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Мостовском р-не, кордон Умпырь, г. Большой Тхач, заказник «Камышанова поляна», Баранова Поляна, пгт Псебай, хр. Герпегем, ст. Андрюки, с. Шедок, ст. Бесленевская. В литературе популяция не описана, в Отрадненском р-не отмечается на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» без указания численности [13]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

10. *Helleborus caucasicus* C. Koch ex A. Braun – морозник кавказский, зимовник кавказский: 1) обильно представлен на правом берегу р. Уруп (более 1000 особей), в буковых сообществах, 8.VIII 2022, 707 м н. ур. м., 44°4'12.828» N 41°20'54.240» E.; 2) в бассейне р. Кува, от балки Гамовской до х. Ильич, в буковых сообществах, не более 500 особей, 24.VI 2024, 913 м н. ур. м., 44°3'5.724» N 41°21'57.276» E. Произрастает в прибрежной зоне от Новороссийска до Сочи, Республике Адыгея, Мостовском р-не, на хр. Герпегем и в окр. х. Кизинка [1, 11]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. Вид описан для памятника

природы «Кувинское ущелье» [17-18] и памятника природы «Тис ягодный Отраденский» без указания численности [16]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

11. *Iris furcata* Bieb. [*Iris aphylla* L.] – ирис рогатый, ирис вильчатый, касатик безлистный: правый берег р. Уруп, грот Балкон, открытая скальная площадка над Урупом площадью 100-150 м², 42 генеративных и 29 вегетативных особей, 10.V 2024, 704 м н. ур. м., 44°4'4.692» N 41°20'27.420» Е. Кавказский эндемик, описан на г. Аибга и в Мостовском р-не, хр. Герпегем, г. Шахан, балка Капустина, г. Большой Тхач [1] и окр. х. Кизинка [11]. В «Конспекте флоры Кавказа» отмечен для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. По данным С.А. Литвинской [9] встречается в Уруп-Тебердинском фл. р-не, Теберда, Кропоткинский р-н, Отраденский р-н, окр. ст. Преградной, окр. х. Ильич, и Бело-Лабинском фл. р-не, в Республике Адыгея, Мостовском р-не, г. Большой Тхач, пгт Псебай, хр. Герпегем, г. Шахан, с. Солёное, Отраденском р-не, окр. х. Ильич. В Отраденском р-не также произрастает на территории памятника природы «Тис ягодный Отраденский» [13] и в окр. х. Ильич [1]. Причём в окр. х. Ильич, по данным С.А. Литвинской, отмечена высокая плотность, более 300 особей [1]. В рамках проведённых авторами исследований выявлено только одно место произрастания таксона, общее количество – 71 особь, что может свидетельствовать о снижении численности *Iris furcata* в окр. х. Ильич. Включён в Красную книгу КК (2 ИС) и Красную книгу РФ (2 У) [1-2].

12. *Listera ovata* (L.) R. Br. – тайник овальный, тайник яйцевидный: 1) 22 единичных особи, в буковом сообществе, от балки Хабакирова, грот «Мечта Должикова», до р. Бардачка по левому берегу р. Кува, 24.VI 2024, 1096 м н. ур. м., 44°1'48.828» N 41°18'44.244» Е.; 2) 1 особь, 300 м от места слияния р. Кува и р. Уруп, правый берег р. Уруп, буковое сообщество, 22.VI 2024, 660 м н. ур. м., 44°4'57.000» N 41°21'15.804» Е. На территории Краснодарского края описаны популяции в Северском, Абинском, Крымском р-нах, в окр. г. Анапа, г. Новороссийск, г. Геленджик, г. Туапсе, г. Сочи и в Мостовском р-не, хр. Герпегем и балка Капустина [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. По данным С.А. Литвинской [9] встречается в Уруп-Тебердинском фл. р-не, р. Закан, и Бело-Лабинском фл. р-не, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, окр. базы «Серебряный ключ», Мостовском р-не, хр. Герпегем, балка Капустина. В литературе популяция не описана, в Отраденском р-не отмечается на территории памятника природы «Тис ягодный Отраденский» без указания численности [13, 16]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

13. *Orchis militaris* L. – ятрышник шлемоносный: 2 особи между балкой Собачьей и р. Кува, разнотравный луг, 9.V 2024, 844 м н. ур. м., 44°4'7.284» N 41°21'47.628» Е. На территории Краснодарского края отмечен в окр. г. Совербаш и г. Папай, в верх. р. Левый Афиц, на р. Широкая балка, в окр. ст. Раевская и г. Туапсе [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного Кавказа отмечен в Бело-Лабинском и Уруп-Тебердинском фл. р-нах без указания мест произрастания [3]. По данным С.А. Литвинской [9], встречается в Уруп-Тебердинском фл. р-не, р. Закан, и Бело-Лабинском фл. р-не, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, заказник «Камышанова поляна», Мостовском р-не, г. Большой Тхач. В литературе популяция не описана, в Отраденском р-не отмечается на территории памятника природы «Тис ягодный Отраденский» без указания численности [13]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ) и Красную книгу РФ (3 БУ) [1-2].

14. *Orchis tridentata* Scop. [*Neotinea tridentata* (Scop.) R.M. Bateman] – ятрышник трёхзубчатый, неотиния трёхзубчатая: встречается обильно, более 300 особей, высота побегов и размер цветков меньше по сравнению с причерноморскими популяциями, произрастает на разнотравных лугах от р. Бардачка, левый берег р. Кува, до х. Ильич, 9.V 2024, 894 м н. ур. м., 44°3'44.316» N 41°21'45.540» Е. Отмечен в Мостовском р-не, на г. Кизинчи [11], хр. Герпегем, Северском р-не, в прибрежной зоне, от г. Анапы до г. Сочи [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» для Западного

Кавказа приводится без указания мест произрастания [3]. По данным С.А. Литвинской [9] произрастает в Бело-Лабинском фл. р-не, в Республике Адыгея, Мостовском р-не, хр. Герпегем, Отрадненском р-не, окр. х. Ильич. В Отрадненском р-не таксон также отмечается на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» без указания численности [13]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ), Красную книгу РФ (3 БУ), Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) [1–2].

15. *Orobanche gamosepala* Reut. – заразиха сrostночашелистиковая: на левом берегу р. Кува, от р. Бардачка до можжевельного мыса, между р. Уруп и балкой Гамовской, 58 генеративных особей на разнотравных лугах, 10.V 2024, 1031 м н. ур. м., 44°2'44.016» N 41°20'58.092» E. Все обнаруженные особи паразитируют на *Geranium sanguineum* L. Отмечен на хр. Аибга, в Мостовском р-не, верховья р. Малая Лаба, Отрадненском р-не, окр. х. Ильич [1]. Причём наблюдается увеличение численности популяции: по данным С.А. Литвинской за 2017 г., на площади 4 га было отмечено 9 цветущих особей [1]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ).

16. *Platanthera chlorantha* (Custer) Rchb. – любка зелёноцветковая: встречается единично, зафиксировано 34 генеративных особи с распустившимися цветками, от можжевельного мыса до х. Ильич, вдоль р. Кува, левый берег, и вдоль р. Уруп, правый берег, в буковых и буко-грабовых сообществах, 9.V 2024 зафиксированы листья и нераспустившиеся цветки, 23.VI 2024 – цветущие особи, 775 м н. ур. м., 44°3'52.920» N 41°20'31.920» E. Встречается от Анапы до Сочи, а также в окр. г. Горячий ключ, в Мостовском, Северском, Апшеронском р-нах [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. С.А. Литвинская [9] отмечает для Уруп-Тебердинского фл. р-на, бассейн р. Уруп, окр. ст. Удобной, Республика Карачаево-Черкесия, северо-западный склон г. Баранаха, и Бело-Лабинского фл. р-на, в Республике Адыгея, Апшеронском р-не, г. Оштен, заказник «Камышанова поляна», Мостовском р-не, левый берег р. Уруштен. В литературе популяция не описана, в Отрадненском р-не таксон отмечался В.И. Грубовым и Л.И. Иваниной в 1945 г., окр. ст. Удобной, между балками Мокрянка и Белый Ерик, без указания численности [5]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ), Приложение II Международной Конвенции СИТЕС (2012) и Европейский Красный список (2011) [1].

17. *Taxus baccata* L. – тис ягодный: обильно распространён в буковом сообществе, на северном макросклоне бассейна р. Кува от г. Громатуг по балке Гамовской до можжевельного мыса, отмечено 22 возрастных особи с $d_{1,3} = 20-28$ см, всего более 600 особей, 24.VI 2024, 1071 м н. ур. м., 44°1'43.752» N 41°18'42.084» E. Описан в прибрежной зоне от Анапы до Сочи, в Мостовском р-не, на р. Ходзь, в окр. х. Кизинка [11], окр. горы Большой Тхач и на территории Карачаево-Черкесии [1]. В «Конспекте флоры Кавказа» приводится для Западного Кавказа без указания мест произрастания [3]. В литературе популяция не описана, в Отрадненском р-не произрастает на территории памятника природы «Тис ягодный Отрадненский» [13, 16]. Включён в Красную книгу КК (3 УВ) и Красную книгу РФ (2 У) [1–2].

Заключение. Растительные сообщества в окрестностях х. Ильич Отрадненского района уникальны и малоизучены. Исследования, проведённые в 2022 и в 2024 гг. в междуречье р. Уруп и р. Кува, позволили выявить 27 видов сосудистых растений, внесённых в Красную книгу Краснодарского края, из которых 1 вид *Scrophularia chrysantha* имеет природоохранный статус 1 КС «Находящийся в критическом состоянии» и 4 вида, *Epipactis palustris*, *Cephalanthera rubra*, *Iris furcata*, *Ostrya carpinifolia*, имеют природоохранный статус 2 ИС «Исчезающие» [1]. 10 таксонов ранее не фиксировались на территории Отрадненского района. Также описано 10 видов растений, включённых в перечень объектов растительного мира, занесённых в Красную книгу Российской Федерации, из которых 1 вид, *Ostrya carpinifolia*, имеет природоохранный статус 2 И «Исчезающий», 2 вида, *Taxus baccata* и *Iris furcata*, имеют статус 2 У «Уязвимые» и 1 вид *Galanthus alpinus* внесён с природоохранным статусом 3 У «Уязвимые» [2]. Таким об-

разом, стоит отметить высокую соэологическую значимость данной территории в контексте сохранения редких видов сосудистых растений среднегорного пояса Западного Кавказа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы. III издание / Отв. ред. С. А. Литвинская. – Краснодар: Адм. Краснодар. края, 2017. – 850 с.
2. Российская Федерация. Приказ Минприроды РФ от 23.05.2023 №320. Об утверждении перечня объектов растительного мира, занесённых в Красную книгу Российской Федерации [Зарегистрировано в Минюсте РФ 21.07.2023 №74362].
3. Конспект флоры Кавказа: В 3 томах / Отв. ред. акад. А. Л. Тахтаджян. Т. 3, ч. 1 / Ред. Ю.Л. Меницкий, Т.Н. Попова, Г.Л. Кудряшова, И.В. Татанов. – СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 469 с.
4. Зернов А.С. Флора Северо-Западного Кавказа – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – 664 с.
5. Зернов А.С. Флора Северо-Западного Кавказа – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – 664 с.
6. Красная книга Чеченской Республики. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных. Второе издание. – Ростов Н/Дону, изд. «Полиграф-комбинат». 2020. – 468 с.
7. Фатерыга А.А., Фатерыга В.В. 2018. Род *Epipactis* Zinn (Orchidaceae) во флоре России. – *Turczaninowia*, 2018. – 21 (4): 19–34.
8. *Fateryga A.V., Fateryga V., Popovich A.V., Averyanova E., Kreutz K.C.A.J.* New data on the genus *Epipactis* (Orchidaceae) in the North Caucasus with description of a new species. – *Phytotaxa*, 2018. – 358 (3): 278–288.
9. Литвинская С.А. Таксономическая и биогеографическая характеристика флоры Западного Предкавказья и Западного Кавказа: Phylum Magnoliophyta: Classis Liliopsida. Т.2(1). – Москва: Наука, 2019. – 560 с.
10. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы. Издание второе, исправленное / Отв. ред. д.б.н., проф. А.В. Ена и к.б.н. А.В. Фатерыга. – Симферополь: ООО «ИТ «АРИАЛ», 2016. – 480 с.
11. Пикалова Н.А., Руденко И.В., Бочко Т.Ф., Захарченко Е.И. Редкие виды растений в окрестностях хутора Кизинка (Краснодарский край) // Комплексное изучение экосистем горных территорий – Грозный, 2023. С. 277–283.
12. Галушко А.И. Флора Северного Кавказа. Определитель. Т. 3. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1980.
13. Шумкова О.А., Криворотов С.Б., Букарева О.В., Архипов Р.А. Изучение распространения охраняемых растений на Северо-Западном Кавказе // Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: Биология и экология. №3 (55). – Тверь, 2019. С. 186–193.
14. Пикалова Н.А., Руденко И.В., Волкова Т.А. Мониторинг и выявление местонахождений *Samolus pendula* Vieb. (Samolaceae) в Краснодарском крае // Комплексное изучение экосистем горных территорий – Грозный, 2023. С. 316–320.
15. Литвинская С.А., Пикалова Н.А., Островских С.В. Проблема сохранения памятника природы «Гуамское ущелье» в связи с развитием джипингового туризма // Географические исследования Краснодарского края. 2015. Вып. 9. С. 111–119.
16. Литвинская С.А. Заповедная природа Кубани. Монография. Т. 3. Белгород: ООО «КОН-СТАНТА», 2023.
17. ООПТ Кувинское ущелье [<https://www.uoptkk.ru/kuvinskoe-ushhele>].
18. Литвинская С.А. Заповедная природа Кубани. Монография. Т. 2. Белгород: ООО «КОН-СТАНТА», 2023.

Экология

*Асфандиярова Л.Р., кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой
Хакимова Г.В., старший преподаватель
Лузина М.С., старший преподаватель
Овсянникова И.В., старший преподаватель*

*Пряничникова В.В., кандидат технических наук, доцент
(Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке))*

УДК 502(571.621)

ЛАБОРАТОРНЫЙ АНАЛИЗ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

В работе приведены результаты проведенных экспериментальных исследований концентраций аэрозольных примесей в снеговом покрове г. Стерлитамака. Определены массовые концентрации химических элементов в снеговых пробах методом количественного химического анализа. На основании результатов лабораторных испытаний, сделаны выводы об изменчивости концентраций химических элементов в снеговых пробах в зависимости от их распределения в городе.

Ключевые слова: химический анализ, эксперимент, снежный покров, отобранные пробы, загрязненность, окружающая среда.

Asfandiyarova L.R.

Khakimova G.V.

Luzina M.S.

Ovsyannikova I.V.

Pryanichnikova V.V.

LABORATORY ANALYSIS OF SNOW COVER IN AN INDUSTRIAL CITY

The paper presents the results of experimental studies of the concentrations of aerosol impurities in the snow cover of the city of Sterlitamak. The mass concentrations of chemical elements in snow samples were determined using the method of quantitative chemical analysis. Based on the results of laboratory tests, conclusions were drawn about the variability of the concentrations of chemical elements in snow samples depending on their distribution in the city.

Keywords: chemical analysis, experiment, snow cover, samples taken, pollution, environment.

В зимний период был исследован элементный состав аэрозольных загрязнений снежного покрова, взято 22 пробы для определения характерной динамики концентраций химических элементов, содержащихся в снеге (рис. 1). Снежный покров установился вовремя, в свои климатические сроки.



Рис. 1. Отбор проб снежного покрова на исследуемой территории

Исследования снежного покрова проводились в соответствии с существующими нормативно-методическими документами [1, 2].

Пробы отобрали до начала снеготаяния в I декаде марта, т.к. они дают интегральный состав аэрозолей и характеризуют комплексное загрязнение снежного покрова в течение всего зимнего сезона.

Расположение точек пробоотбора выбиралось на основе функционального районирования и зонирования города [3-4]. Пробоотбор для определения загрязненности снега проводился в пределах санитарно-защитных зон основных предприятий загрязнителей, в жилых массивах, на перекрестках улиц с наиболее оживленным движением. В качестве фоновых точек были выбраны участки в 10 и 40 км от города Стерлитамака.

Исследование снегового покрова можно разделить на отбор снеговых проб, подготовку исследуемых образцов, исследование отобранных проб, обработку и интерпретацию результатов [5].

К предварительной обработке предъявляют следующие основные требования: растапливанию и фильтрованию подлежит весь объем пробы, выполнение операции фильтрования следует проводить непосредственно в момент растапливания снега. В растопленном снеге изучались обе фазы: в фильтрате определяли содержание основных растворимых макрокомпонентов талой воды, а в осадке – содержание взвешенных веществ.

Для анализа состояния снежного покрова г.Стерлитамака измерялись показатели: величина рН, содержание сульфат-ионов, концентрация нитрат-ионов, содержание хлорид-ионов, твердых частиц, показатель ХПК.

При анализе химического состава снежного покрова были применены следующие методы: электрохимический – для определения рН, меркуриметрический – для определения хлоридов, метод бихроматной окисляемости - для определения ХПК, гравиметрический – для определения взвешенных веществ и колориметрический – для определения сульфатов и нитратов. Химическая индикация загрязнения снежного покрова основывается в первую очередь на сопоставлении концентраций загрязняющих веществ городских проб снега с соответствующими значениями их фоновых аналогов.

Анализ пространственных распределений в снежный покров в области влияния крупного промышленного центра показал неравномерность содержания загрязняющих веществ, обусловленную воздействием антропогенных источников. Точки пробоотбора были распределены по территории неравномерно, поэтому все точки были нанесены на электронную карту города с точной географической привязкой. По результатам проведенных исследований построены картосхемы накопления загрязняющих веществ в снежном покрове (рис. 2).

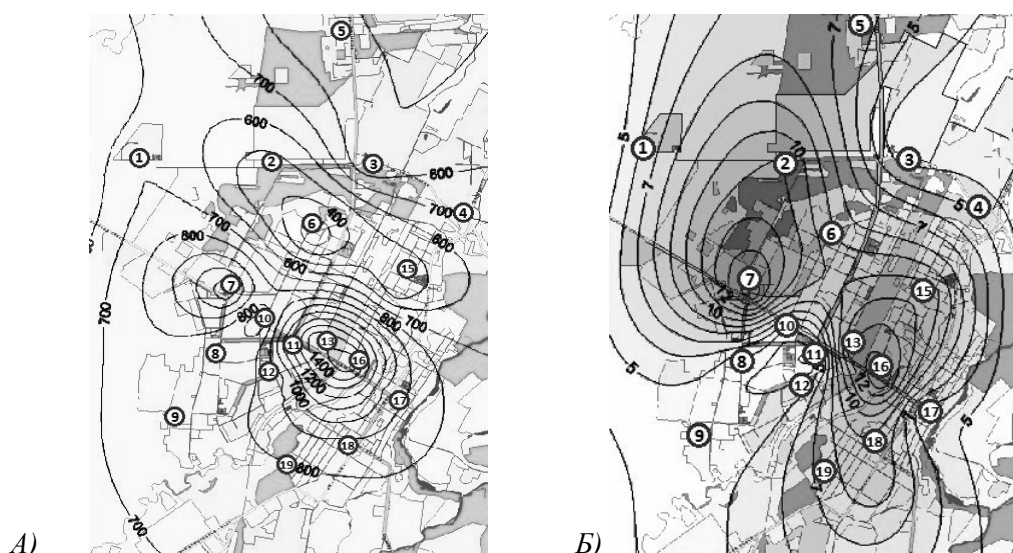


Рис. 2. Карта-схема распределения взвешенных частиц (а) и хлОрид-ионов (б)

В отобранных пробах снежного покрова превышения фоновых значений зафиксированы по всем исследуемым параметрам. В целом по городу явно выделяется 2 концентрационных максимума – в северной части города, где расположены крупные промышленные предприятия, и в центре, где расположены автодороги с интенсивным движением [6]. Полученные в ходе исследования результаты показали, что наибольшие концентрации загрязняющих веществ в снежном покрове наблюдались в районе санитарно-защитных зон предприятий и на оживленных участках автодорог. Установлено, что на распределение загрязнителей по территории города оказывают влияние физико-географические характеристики местности и метеорологические условия рассеивания загрязняющих веществ. Экспериментальные данные говорят о том, что из атмосферы в снежный покров поступает значительное количество вредных примесей, которое затем может вымываться в почву и подземные воды.

Таким образом, мониторинг снежного покрова можно использовать для получения дополнительной информации о пространственном загрязнении атмосферного воздуха: решение этой задачи весьма актуально в условиях ограниченности постов стационарного наблюдения в г. Стерлитамак.

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17.1.5.05–85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков
2. РД 52.04.186 - 89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы
3. Хакимова Г.В., Асфандиярова Л.Р. Оценка влияния антропогенных и техногенных факторов на загрязненность почвенного покрова города // Системы контроля окружающей среды. – 2021. – № 4 (46). – С. 118–123.
4. Даминев Р.Р., Асфандиярова Л.Р., Юнусова Г.В., Панченко А.А., Овсянникова И.В. Изучение вертикальной миграции веществ в почвах промышленного города // Нефтегазовое дело. – 2017. Т. 15. № 1. С. 236–240.

5. *Донченко В.К.* Актуальные проблемы изучения техногенного загрязнения окружающей среды // *Экологическая безопасность*. 2007. № 1–2. С. 4–24.
6. *Асфандиярова Л.Р., Даминев Р.Р., Галиев А.Л., Юнусова Г.В.* Применение ГИС-технологий с целью визуализации результатов мониторинга снежного покрова промышленного города // *Экологические системы и приборы*. – 2013. – № 3. – С. 13.

Голубева Е.И., доктор биологических наук, профессор

Тулская Н.И., кандидат географических наук, доцент

Глухова Е.В., кандидат географических наук, старший научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.11

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В СФЕРЕ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье анализируется опыт реализации программы дополнительного профессионального образования в сфере экологии и природопользования на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова за период более, чем 20 лет. Рассматриваются современные тенденции, возможности использования новых, в том числе дистанционной, форм обучения и перспективы его развития. Опыт может быть полезен различным образовательным, научно-исследовательским и производственным организациям.

Ключевые слова: *дополнительное профессиональное образование, экология, география, рациональное природопользование, охрана окружающей среды.*

Golubeva E.I.

Tulskaya N.I.

Glukhova E.V.

ADDITIONAL PROFESSIONAL EDUCATION IN THE FIELD OF ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: NEW OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

The article analyzes the experience of implementing programs of additional professional education in the field of ecology and environmental management at the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University for a period of more than 20 years. Modern trends, possibilities of using new forms of education, including distance learning, and prospects for its development are considered. The experience can be useful to various educational, research and production organizations.

Keywords: *additional professional education, ecology, geography, rational nature management, environmental protection.*

Введение. Актуальными задачами современности являются сохранение и рациональное использование природных ресурсов, оценка антропогенного воздействия на окружающую среду, а также разработка методов восстановления всех компонентов экосистем в результате деструктивных процессов. Эти вопросы достаточно давно привлекают внимание не только ученых, но и специалистов, занимающихся вопросами управления территориями. Процессы деградации связаны с действиями целого комплекса факторов как природного, так и антропогенного характера. Диагностика состояния экосистем требует комплексной оценки их структуры, взаимосвязи с различными компонентами для разработки и осуществления стратегии интегрированного управления устойчивым развитием территорией [1].

Важным сегодня является получение качественного образования в области экологии и рационального природопользования для понимания причинно-следственных связей существующих и назревающих экологических проблем для целей устойчивого развития территорий. Преимущество дополнительного профессионального образования связано с его мобильностью, адаптированностью к требованиям рынка труда, оно быстрее реагирует на изменения в современной структуре квалификаций и потребностей общества [2, 3]. К освоению программ профессиональной переподготовки допускаются лица, имеющие среднее профессиональное и (или) высшее образование. Согласно статье 76 Федерального закона от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 22.06.2024) «Об образовании в Российской Федерации» дополнительное профессиональное образование направлено на удовлетворение образовательных и профессиональных потребностей, профессиональное развитие человека, обеспечение соответствия его квалификации меняющимся условиям профессиональной деятельности и социальной среды [4,5].

Цель нашего исследования – анализ форм дополнительного профессионального образования в сфере экологии и природопользования, его актуальность и перспективы развития на примере многолетнего опыта географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Объекты и методы. На географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова была разработана программа профессиональной переподготовки по направлению «Экология и рациональное природопользование». Цель программы – формирование базовых представлений об основных теоретических, методических и прикладных направлениях экологии, рационального использования и управления природными ресурсами, важнейших экологических проблемах современности, причинах их возникновения и возможных путях решения.

В основные задачи программы входят ознакомление слушателей с современной экологией как междисциплинарным комплексом знаний, понятийно-терминологическим аппаратом, применяемыми методами анализа и решения возникающих экологических проблем на разных масштабных уровнях. Важным этапом программы является знакомство с основными характеристиками экосистемного уровня организации биосферы, пониманием причин возникновения различных экологических проблем в окружающей среде. Большое внимание уделяется получению знаний о пространственных особенностях территориальной структуры природопользования, классификациях видов природных ресурсов, возможности применения данных дистанционного зондирования Земли и ГИС- технологий для оценки состояния окружающей среды в результате хозяйственной деятельности, перспективы использования инновационных технологий и разработке стратегии управления и сохранения биосферы.

В результате обучения на программе закладываются фундаментальные знания о функционировании живой природы и экосистем в целом, их биотических и абиотических компонентах, а также об единстве и закономерностях взаимоотношений природы и общества, о роли и последствиях антропогенного воздействия на окружающую среду. К реализации программы дополнительного профессионального образования - чтению лекций, проведению семинаров и практических занятий, а также подготовке выпускных квалификационных работ слушателей привлекаются преподаватели и научные сотрудники не только географического факультета, но и других факультетов МГУ.

Результаты. Программы ориентированы на людей, уже имеющих высшее или среднее специальное образование, преимущественно работающих, или студентов выпускного курса, поэтому они реализуются в очно-раочной (вечерней) и заочной формах с широким применением дистанционных технологий. Это позволяет получить знания в новой области науки и практической деятельности как жителям Московского региона, так и других регионов России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

По программе профессиональной переподготовки обучение проходит в течение одного учебного года и завершается защитой итоговой квалификационной работы (ИКР) на заседа-

нии итоговой аттестационной комиссии (ИАК). Тематика ИКР очень разнообразна, слушатели выбирают темы в соответствии со своим профессиональным интересом и/или перспективой трудоустройства по новой специальности. В последнее время самыми популярными темами выпускных работ среди слушателей программ являются темы, связанные с формированием системы утилизации отходов, оценкой воздействия промышленного производства на компоненты экосистем и перспективы использования возобновляемых источников энергии.

Если говорить о формализованных результатах обучения, то в процесс обучения формируются компетенции, необходимые для профессиональной деятельности в сфере экологии и рационального природопользования, в том числе:

- владение концептуальными основами географии, экологии и природопользования;
- знакомство с современными лабораторными и полевыми методами исследований состояния компонентов окружающей среды; способность применить их на практике;
- способность к использованию знаний о природных, экономических, социальных закономерностях формирования ландшафтов для разработки подходов к решению проблем природопользования и устойчивого развития;
- знакомство с методами анализа информации с помощью данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий для диагностики состояния окружающей среды; умение применять данные дистанционного зондирования и наземных наблюдений для анализа особенностей территориальных структур природопользования;
- готовность к решению практических задач в области экологии и природопользования на основе базовых знаний об общих и правовых основах природопользования и экономики природопользования [6].

Полевые практики программой не предусмотрены, однако иногда удается, благодаря энтузиазму слушателей и преподавателей, организовать выезды на учебно-научные базы или особо охраняемые природные территории, что, несомненно, способствует профессиональной подготовке.

Нельзя не сказать об изменениях, которые связаны с различными вызовами времени. Так, например, до пандемии Covid-19 занятия проходили преимущественно в очном формате. Во время пандемии нами курсы были перестроены в дистанционный формат, что расширило возможности обучения на программе слушателей разных регионов. География слушателей за последние четыре года показывает, что это предоставляет возможность профессиональной переподготовки большому количеству людей.

Заключение. Многолетний опыт работы по реализации программы дополнительного профессионального образования позволяет констатировать, что в ней участвуют люди с выраженной мотивацией и желанием получить новые знания, как отмечают все преподаватели. Это четко отражается и в процессе обучения, при выборе тем выпускных работ, так и в ответственном отношении на всех этапах обучения. Как правило, наши выпускники находят работу, отвечающую их новому образованию и профессиональным интересам. Некоторые выпускники продолжают образование в сфере экологии, географии и природопользования в аспирантуре, успешно защищают диссертации.

Благодарности. Публикация подготовлена в рамках научной темы госзадания кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования» и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации. Цели устойчивого развития ООН и Россия. Под редакцией С.Н. Бобылева, Л.М. Григорьева, 2016. 44 с.
2. Дополнительное профессиональное образование: о законодательном и методическом обеспечении. Сборник методических материалов. / Авторы составители: Рябко Т.В., Шмелькова Л.В. – Ярославль: Изд-во Академии Пастухова, 2015. – 260 с.
3. Сборник трудов по проблемам дополнительного профессионального образования. Консорциум «Международная ассоциация профессионального дополнительного образования». Москва. №42, 2021. 146 с.
4. Стратегические ресурсы и условия устойчивого развития Российской Федерации и ее регионов. Под редакцией академика В.М. Котлякова и профессора А.А. Тишкова. – М., Институт географии РАН. 2014. – 166 с.
5. Федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ (ред. от 22.06.2024) «Об образовании в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 23.06.2024)
6. Экология и рациональное природопользование: Учебное пособие / Д. Д. Бадюков, Т. А. Воробьева, А. Н. Геннадиев и др. – Москва: ФГБУ Издательство Наука, 2022. – 600 с.

Nabiyeva M.A.

Hajiyeva S.R.

Shamilov N.T.

Aliyeva T.I.

ECOCHEMICAL STUDY OF WATER SAMPLES TAKEN FROM SABIRABAD AREA OF ARAZ RIVER

In order to evaluate the current biological and chemical state of the Araz River and to carry out further scientific research, water samples were collected from the Sabirabad region, also known as the «Sugovushan» location, where the Kura and Araz rivers converge. The collected water samples were analyzed for physical and chemical indicators such as temperature, turbidity, electrical conductivity, total dissolved solids, dissolved oxygen, alkalinity, pH, and the amounts of sulfate, chloride, nitrate, nitrite, phosphate anions, and ammonium ions. To measure the quantity of phosphate, chloride, and sulfate ions in water samples, a standard titrimetric technique was employed. Additionally, the amount of heavy metals in the samples was ascertained using the EPA 200.7: Determination of metals and trace elements in water by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry method. Total hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) were determined by liquid extraction method and gas chromatograph with flame ionization detector.

Keywords: pollution, bottom sediments, sulfate ion, ammonium ion, heavy metals, hydrocarbons

Набиева М.А., аспирант

*Гаджиева С.Р., доктор химических наук,
профессор*

*Шамилов Н.Т., доктор химических наук,
профессор*

*Алиева Т.И., кандидат химических наук,
доцент*

*(Бакинский государственный университет,
Азербайджан)*

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.04

ЭКОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОБ ВОДЫ, ВЗЯТЫХ В САБИРАБАДСКОМ РАЙОНЕ ИЗ РЕКИ АРАЗ

С целью оценки современного экологического и химического состояния реки Араз и проведения дальнейших научных исследований были взяты пробы воды в Сабирабадском районе, также известном как участок «Суговушан», где сходятся реки Кура и Араз. Собранные пробы воды были проанализированы на предмет физических и химических показателей, таких как температура, мутность, электропроводность, общее количество растворенных твердых веществ, растворенный кислород, щелочность, pH, а также количество сульфатов, хлоридов, нитратов, нитритов, фосфат-анионов и ионов аммония. Для измерения количества фосфат-, хлорид- и сульфат-ионов в пробах воды использовали стандартный титриметрический метод. Дополнительно количество тяжелых металлов в пробах определялось с использованием стандартного метода EPA 200.7: Определение металлов и микроэлементов в воде методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Суммарные углеводороды и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) определяли методом жидкостной экстракции и газовым хроматографом с пламенно-ионизационным детектором.

Ключевые слова: загрязнение, донные отложения, сульфат-ион, ион аммония, тяжелые металлы, углеводороды.

Introduction

The second-biggest river in the South Caucasus region by volume, the Araz River is the essential tributary of the Kura River. Its basin covers 102 thousand km², and its length is 1072 km. The Araz River originates from numerous lakes in the northern foothills of Turkey's Bingol mountain range (about 3,000m above sea level). The part of it until joins the Akhuryan River is in the territory of Turkey. It forms the state border with Turkey, Azerbaijan, Armenia and Iran at a distance of about 600 km from that place to the Bahramtepe confluence of the Imishli district. The Araz River basin's water reserve is 9.10–9.30 km³, the local flow is 1.04–1.40 km³, and the flow from the neighbouring countries is 7.70–8.10 km³ or 85–87%.

Azerbaijan's water policy is based on international water legislation in the field of protection and use of transboundary rivers, as the republic joined the «Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes» (1992, Helsinki) on March 14, 2000. We can confidently emphasize that for Azerbaijan, conducting dialogue and discussions on water issues between all river basin countries, monitoring and exchanging information on the quantity and quality of river water is considered one of the most important issues, and cooperation with neighbouring countries on the basis of bilateral agreements is always preferred. It should be noted that there is no large manufacturing enterprise or industrial enterprise along the distance of the Araz River from Turkey to the Nakhchivan area, and in the border areas of Araz, which starts from Nakhchivan and continues to the Beylagan district. The small rivers flowing from the central regions of Iran, Azerbaijan and Armenia converge in Araz, and in Azerbaijan, no industrial waste or production waste is dumped into these rivers. Consequently, Iran and Armenia are the primary sources of pollution in the Araz River.

Okchuchay, one of the most seriously polluted transboundary rivers of Azerbaijan, also passes through the territory of the Zangilan district and joins the Araz River. Wastes from the Gajaran copper-molybdenum purification plant located at the source of this river, as well as domestic wastes, are discharged into Okchuchay without any treatment, which causes heavy metals and other harmful chemical substances to exceed the permissible limit in that river. As a result, the pollution of Okchuchay further causes pollution of the Araz River. Although the water balance of Okchuchay is about 20 times less than that of Araz, it can destroy 60 per cent of its microflora after flowing into Araz. This not only has a very serious negative impact on the water ecosystem but also makes it impossible for people to use the water necessary for life activities to meet their needs.

Experimental part

The main purpose of the research is to determine the amount of heavy metals, physicochemical indicators, and the presence and chemical composition of total hydrocarbons in the natural water and bottom sediment samples taken from the Sabirabad area, in the part of the Araz River directly before the confluence with the Kura, and to conduct a comparative analysis of the obtained analysis results and the permissible amount indicators. For sampling, transportation, and storage, pre-sterilized containers were utilized, and all procedures followed standard requirements. It should be mentioned that the water's turbidity during the sampling was significantly higher than average, as evidenced by both the analysis results (40 NTU) and visual inspection.

Using a "Water Quality Meter" brand device, the pH, electrical conductivity, dry matter content and temperature of water samples taken from the mouth of the Araz River in September were determined. In addition, the amount of total dissolved solids was determined by drying at 180°C by the standard method, total hardness was checked by complexometric titration, and total alkalinity, carbonate and hydrocarbon content in water were checked by the standard titrimetric method. The samples used for this purpose were first passed through filter paper to remove suspended matter.

Chloride ions in water samples taken from Araz River water were determined by titrimetric method. In general, the increase in the concentration of chloride ions in the river reduces the quality

of water and makes it unsuitable for drinking water supply, as well as causes problems in its use in agriculture and other technical and economic purposes. According to ISO 9297 international standard, chloride ions in different types of water samples are determined by Mohr's method. To measure the amounts of phosphate, chloride, and sulfate ions in water samples, a standard titrimetric method was applied. Sulfosalicylic acid was used in the spectrometric method to determine the amount of nitrate ions in drinking water, in compliance with the ISO 7890-3 «Determination of Nitrate in Water Quality» method.

ISO 6777 molecular absorption spectrometric method was used for the determination of nitrite ions in the collected natural water samples, and the ISO 5664 distillation and titration method was used for the determination of ammonium ions. According to quality requirements in surface water, the permissible concentration limit for ammonium ions should be 0.5 mg/l. The excess amount of nitrite and ammonium ions usually indicates new or periodic pollution of the river, and the amount of nitrates exceeding the permissible concentration limit indicates relatively old pollution.

Determination of heavy metals in natural water samples collected from Araz was carried out in accordance with EPA 200.7 «Standard method for determination of elements in water and wastewater by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry». This method can identify more than 31 analytes to measure the total amount of extractable heavy metals in the dissolved fraction of natural water and wastewater samples. Water samples that contain solid waste and particulate matter are pre-acidified with nitric and hydrochloric acids, and then filtered before analysis to determine the total recoverable heavy metal content. Determining the concentration of heavy metals in the sample is the goal. The process involves determining several elements either simultaneously or sequentially. Finally, the characteristic emission spectra of the atomic lines are measured using optical spectrometry using an Agilent 7500Series ICP-MS instrument. Table 1 presents the results from the analysis of water samples collected from the Araz River (Sugovushan area).

*Table 1***Results of analysis of water samples taken from Sugovushan area of Araz river**

Parameter	Unit	Result	Method	Quality requirements
pH	pH unit	7.35 (20°C)	SM 4500-H*B	6.5-9.5
*Turbidity	NTU	40.4	ISO 7027-1	<2.6
Conductivity	µS/sm	2280 (20°C)	SM 2510 B	<2500
*Total dissolved solids (TDS)	mg/l	1475	SM 2540 C	<1000
*Total hardness	mgCaCO ₃ /l	570	SM 2340 C	<350
*Total alkalinity	mmol/l	2.86	ISO 9963	2.8
Carbonate	mg/l	0	ISO 9963	1
Bicarbonate	mg/l	174	ISO 9963	100

Calcium	mg/l	106	SM 3500 Ca	<130
*Magnesium	mg/l	74	SM 3500 Mg	<65
*Ammonium	mg/l	<0.1	ASTM D 1426	0.5
Chloride	mg/l	322	SM4500CT B	<250
Nitrite	mg/l	<0.03	SM 4500 NO ₂ ⁻	0.5
Nitrate	mg/l	<0.4	SM 4500 NO ₃ ⁻	<50
*Sulfate	mg/l	451	SM 4500 SO ₄ ⁻	<250
Phosphate ion	mg/l	1.22	SM 4500 P C	<3.5
Arsenic	µg/l	9.1	EPA 200.7	10
Aluminium	µg/l	<1	EPA 200.7	0.5
Boron	µg/l	98	EPA 200.7	100
Iron	µg/l	8.8	EPA 200.7	200
Manganese	µg/l	1.5	EPA 200.7	50
Zinc	µg/l	22.5	EPA 200.7	500
Nickel	µg/l	<1	EPA 200.7	7
Cobalt	µg/l	3.1	EPA 200.7	10
Chromium	µg/l	<1	EPA 200.7	50
*Molybdenum	µg/l	15.5	EPA 200.7	0.25
Cadmium	µg/l	<1	EPA 200.7	8
Selenium	µg/l	<1	EPA 200.7	10
*Lead	µg/l	7.2	EPA 200.7	10
Berillium	µg/l	<1	EPA 200.7	0.2
Lithium	µg/l	14	EPA 200.7	-

*Copper	µq/l	5.9	EPA 200.7	1
*Strontium	µq/l	9	EPA 200.7	7

The results of the physicochemical analyses given in Table 1 show that the total amount of some inorganic substances in water samples is close to the maximum permissible limit for drinking water, and in many cases, it is many times higher. In particular, the amount of aluminium, lead, copper and molybdenum exceeding the permissible concentration limit is the result of industrial waste discharged through Okchuchay to Araz. In addition, in the analysis results, it is observed that the amount of sulfate ions exceeds the permissible norm, which in turn affects the biogeochemical processes of carbon, nitrogen and phosphorus, sulfate pollution has a toxic effect on aquatic plants and animal organisms, including fish, invertebrates and amphibians, and has negative effects on human health.

In addition to physicochemical parameters and heavy metals, the amount of hydrocarbons was determined in the water samples taken from the Sabirabad area of the Araz River. Analyzes were conducted to quantify total hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in both river water and sediment samples by applying EPA 3510C; EPA 3630C; EPA 8270D analytic methods on an Agilent 7820A branded GC-FID (gas chromatograph flame ionization detector).

Table 2

Results of analysis in water and bottom sediment samples

River water		Bottom sediments	
Parameter	Result	Parameter	Result
Total carbohydrogens, mkg/l	<20	Total carbohydrogens, mg/kg	7.2
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), mkg/l		Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), mq/kg	
Naphthalene	<0.01	Naphthalene	1.6
Acenaphthylene	<0.01	Acenaphthylene	<0.5
Acenaphthene	<0.01	Acenaphthene	<0.5
Fluorene	<0.01	Fluorene	<0.5
Phenanthrene	<0.01	Phenanthrene	2.1
Anthracene	<0.01	Anthracene	<0.5
Fluoranthene	<0.01	Fluoranthene	2.2
Pyrene	<0.01	Pyrene	1.6
Benz(a)anthracene	<0.01	Benz(a)anthracene	2.5
Chrysene	<0.01	Chrysene	2.5
Benz(b+j+k) fluoranthene	<0.01	Benz(b+j+k) fluoranthene	3.2

Benz(a)pyrene	<0.01	Benz(a)pyrene	1.6
Indene(1,2,3-cd)pyrene	<0.01	Indene(1,2,3-cd)pyrene	1.8
Benz(ghi)perylene	<0.01	Benz(ghi)perylene	1.6
Dibenz(ah)anthracene	<0.01	Dibenz(ah)anthracene	0.5
$\sum$ 16 PAH	<0.01	$\sum$ 16 PAH	21.1

The obtained results show that the amount of total hydrocarbons in the water samples taken from the Araz River is 20 µg/l, and in the bottom sediment samples it is 7.2 mg/kg. Quantified polycyclic aromatic hydrocarbons include naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, pyrene, benz(a)anthracene, chrysene, benz(b+j+k)fluoranthene, benz(a)pyrene, indene(1,2,3-cd)pyrene, benz(ghi)perylene, dibenz(ah)anthracene, and according to the obtained results, the total amount of PAK16 is 0.01 µg/l and less in water samples and 21.1 µg/kg in bottom sediment samples.

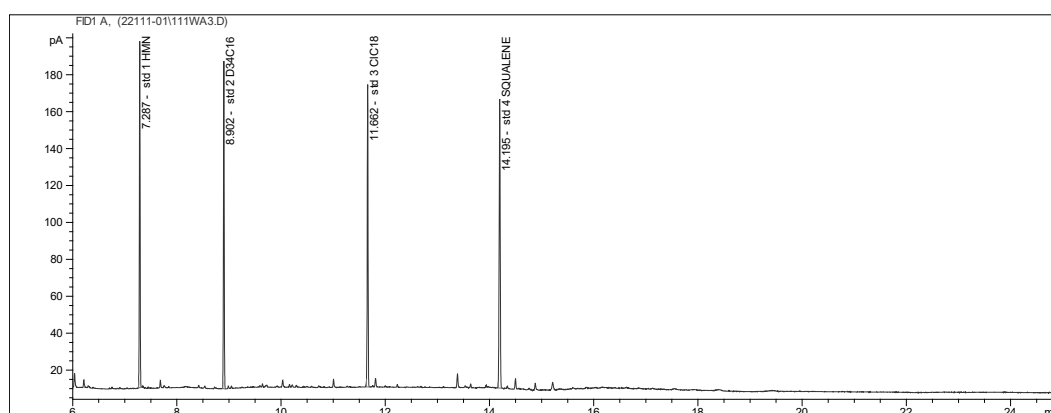


Fig 1. Chromatogram of the amount of total petroleum hydrocarbons in water sample

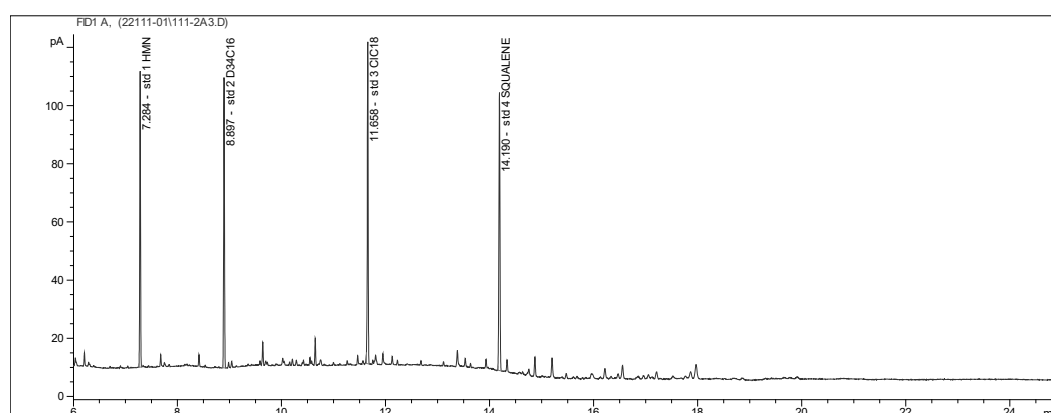


Fig 2. Chromatogram of total petroleum hydrocarbons in bottom sediment sample

GC-FID

The European Union's drinking water standard requires that the total concentration of PAHs in river water should not exceed 0.1 µg/l. According to the chromatograms presented in Figures 1 and 2, based on the result of the analysis of water and bottom sediment samples using an Agilent 7820A

branded flame ionization detector gas chromatograph, samples taken from the Araz River meet these standards.

Discussion of results

In conclusion, based on the overall results, the chemical composition and physicochemical parameters of the water samples taken from the Araz River in the Sabirabad area do not meet the requirements of the state standard AZS 282 «Quality indicators of drinking water provided to consumers. Hygienic requirements and quality control». As per terms of the new standard AZS 929, approved in April 2023, the amount of physical and chemical indicators, ions and heavy metals in samples exceeds the permissible density even more and their use in everyday life and agriculture is impractical. Especially according to the results of the analyses conducted in the collected water samples, heavy metals, ammonium, chloride and sulfate ions exceeding the permissible concentration limit not only worsen the general quality of river water but also can cause dangerous consequences for the health of people and other living organisms if used for agriculture, livestock and as a source of drinking water.

REFERENCES

1. *Hajiyeva S.R., Shamilov N.T., Aliyeva T.I., Samadov C.Z., Samadova A.A.* / Ecological monitoring practice / 2019. P. 113–117
2. *Imanov, F.* (2020). Development of the Plan of Distribution of Surface Water Resources for River Basins of the North-Eastern Slope of the Lesser Caucasus. 74–84p.
3. Ismayilov Rashail. Evaluation of ecological safety of Azerbaijani rivers: on the example of rivers flowing directly to the Caspian Sea: monograph / R. A. Ismayilov; scientific ed. R. M. Mammadov; «Azersu» Open Joint Stock Company.– Baku, 2021. – 272 p.
4. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* / Руководство по химическому анализу вод суши / – Ленинград: Гидрометеиздат, - 1979. S. 11–22.
5. *Fouladi Osgouei, H., Zarghami, M., Mosafari, M. et al.* A novel analysis of critical water pollution in the transboundary Aras River using the Sentinel-2 satellite images and ANNs. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 9011–9026 (2022).
6. *Махмудов Р.Н.* / Водные ресурсы Азербайджанской республики / Баку: – 2003. – 23 с.
7. *Nagiyev Z.A.* Water sources of Baku city and Absheron region. Baku, 2020, 516 p.
8. *Джафарли С.С., Гаджиева С.Р., Алиева Т.И.* //Определение некоторых тяжелых металлов в донных осадках реки Баргюшад Губадлинского района. Materials of the IV Republican Scientific Conference dedicated to the 115th anniversary of the birth of Academician Hasan Aliyev on «Ecology: Nature and Society Problems», Baku, December 19-20, 2022, pp. 38–39.
9. *Hajiyeva S., Aliyeva T., Samadova A., Kulieva B.* // Environmental assessment of natural water sources in the village of Guzanli, Aghdam region // The 7th International Conference: «Ecological and Environmental Chemistry-2022», Chisinau, Republic of Moldova EEC –2022.
10. *Suleymanov, B., Ahmedov, M., Safarova, K. et al.* Metals in Main Rivers of Azerbaijan: Influence of Transboundary Pollution. *Water Air Soil Pollut* 213, 301–310 (2010).
11. *Гаджиева С.Р., Алиева Т.И., Велиева З.Т., Авазова М.А., Самадова А.А.* // Определение физико-химических показателей в пробах воды, отобранных с территории Восточно-Зангезурского экономического района. VI Международная научная конференция «Техногенные системы и экологический риск», 20-21 апреля 2023 г, Обнинск, Россия, с.320–321.
12. *Samadova A., Jabbarova F.* «Eco-chemical analysis of the river Okhchuchay» International Conference Modern Problems of Theoretical& Experimental Chemistry devoted to the 90th anniversary of academician Rafiga Aliyeva. Baku, 2022, p. 172–173.

13. *Farda, I. & Alakbarov, A. & Rajabov, Rustam & Nuriyev, A.* (2015). Water Security of the Azerbaijan Republic: current situation and perspectives. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 366. 115-116. 10.5194/piahs-366-115-2015.
14. *Hajiyeva S.R., Aliyeva T.I., Avazova M.A.* // Dynamics of Molybdenum concentration change in Okchuchay 245–247. «Ecology and soil sciences in the 21st century» III Republican Scientific Conference. – p.245

Пакурина А.П., доктор химических наук,
профессор

(Дальневосточный государственный
аграрный университет)

Платонова Т.П., кандидат химических
наук, доцент

(Амурский государственный универси-
тет)

Гуленова Т.В., аспирант

(Дальневосточный государственный
аграрный университет)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.05

ПТИЦЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Птиц успешно используют для биоиндикации загрязнения окружающей среды. Птицы способны накапливать загрязняющие вещества. В данной работе рассмотрены результаты изучения содержания тяжелых металлов в перьях птиц, которые обитают в Муравьевском зоологическом заказнике (Амурская область). Содержание тяжелых металлов в оперении птиц уменьшалось в ряду Fe>Zn>Cu>Pb>Ni>Co>Cd. Птицы отряда воробьинообразные больше накапливали свинца (до 4,0 мг/кг) по сравнению с околоводными птицами, в перьях которых содержание свинца не превышало 2,4 мг/кг.

Ключевые слова: перья птиц, биоиндикация, загрязнение тяжёлыми металлами, природный заказник.

Pakusina A.P.

Platonova T.P.

Gulnova T.V.

BIRDS AS INDICATORS OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE ENVIRONMENT

Birds are successfully used for bioindication of environmental pollution. Birds are capable of accumulating pollutants. This article discusses the results of studying the content of heavy metals in the feathers of birds that live in the Muravyevsky Zoological Reserve (Amur region). The concentration of heavy metals in the plumage of birds decreased in a row Fe>Zn>Cu>Pb>Ni>Co>Cd. Birds of the order sparrow-like accumulated more lead (up to 4.0 mg/kg) compared with near-water birds, in whose feathers the lead content did not exceed 2.4 mg/kg.

Keywords: bird feathers, bioindication, heavy metal pollution, nature reserve.

Введение. Птицы реагируют на изменения, происходящие в среде обитания, поэтому являются индикаторами экологического состояния окружающей среды. Птицы широко распространены в различных климатических зонах, долго живут, разнообразны по видам, по типу питания и образу жизни. В окружающей среде концентрация загрязняющих веществ способна изменяться в связи с уменьшением выбросов, однако загрязняющие вещества могут накапливаться в живых организмах и оказывать негативное влияние даже тогда, когда выбросы прекратились [1]. Птицы способны накапливать поллютанты в своём организме из почвы, атмосферы, воды или кормовой базы. Изучение содержания загрязняющих веществ в органах и тканях птиц является важным для изучения районов, подвергшихся техногенному загрязнению [2], крупных горо-

дов и мегаполисов [3], национальных парков и заповедников [4], территории водно-болотных угодий, входящих в Рамсарскую конвенцию [5]. В настоящее время изучается содержание в органах и тканях птиц гербицидов [6], микропластика [7], тяжелых металлов, проявляющих токсичное действие на живые организмы [8]. Загрязняющие вещества определяли во внутренних органах птиц (почки, печень, кровь), в мышцах, в костях [1, 6]. Неинвазивным способом сбора информации является определение содержания поллютантов в оперении, скорлупе, фекалиях [1, 4, 9]. Важным индикатором загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами являются хищные птицы, так как они имеют высокий трофический уровень [10]. Интерес представляет самый многочисленный отряд воробьинообразных, их используют для индикации окружающей среды вблизи металлургических заводов, шахт и других источников загрязнения, эти птицы различаются по образу жизни, способам добычи пищи и другим признакам [11].

Оперение птиц в период роста контактирует с кровеносной системой. Содержание загрязняющих веществ, измеренное в перьях, может значительно отличаться от концентраций в тканях и органах. Существуют различия между концентрациями в различных типах перьев и внутренних тканях птиц для различных классов загрязняющих веществ [10]. Перья не всегда отражают фактические концентрации загрязняющих веществ в организме птицы, но могут быть использованы для регистрации техногенной нагрузки в среде обитания птиц. Содержание тяжелых металлов в перьях птиц часто указывает на экзогенное загрязнение [1]. Микроэлементный состав оперения зависит от места постоянного или временного обитания птиц. По содержанию тяжелых металлов в оперении птиц можно определить место гнездования или зимовки особи. Можно собирать перья во время линьки, но проблема внешнего загрязнения приведёт к необъективно завышенным результатам. Поэтому, для определения эндогенного загрязнения необходимо проводить специальную подготовку перьев и перед исследованием их тщательно промывать. Перья перед исследованием необходимо хранить в условиях, защищенных от потенциальных источников загрязнения и деградации (свет, влага) [12].

Целью работы является изучение содержания тяжелых металлов в оперении птиц.

Объект и методы исследований. Перья промывали ацетоном и бидистиллированной водой, высушивали. Пробоподготовку навески перьев птиц проводили в системе микроволновой минерализации проб при повышенном давлении «Минотавр» (Люмэкс, Россия) методом разложения в течение 20 мин при давлении 8 атм. Массовую концентрацию тяжелых металлов в перьях птиц определяли на спектрометре AAnalyst 400 (Perkin Elmer, США) с пламенной атомизацией. Все анализы проводили в двухкратной аналитической повторности, из двух определений брали усредненный результат.

Районом исследования явился Муравьёвский зоологический заказник областного значения, который расположен на юге Зейско-Буреинской равнины и представлен водно-болотными угодьями с пойменными озёрами. В 1976 г. Муравьёвский заказник включён в Рамсарскую конвенцию водно-болотных угодий Международного значения. Так же встречаются небольшие участки с древесной растительностью, среди которых преобладают ивы (*Salix*), дуб монгольский (*Quercus mongolica*), черемуха Маака (*Prunus maackii*), берёза даурская (*Betula dahurica*). На территории Зейско-Буреинской равнины активно ведётся сельскохозяйственная деятельность, поэтому в период паводков и наводнений со стоками из поверхностных слоёв почв в водно-болотные экосистемы могут поступать загрязняющие вещества [13].

Результаты исследований и их обсуждение. В перьях птиц были определены медь, железо, цинк, никель, свинец, кобальт и кадмий (таблица 1). Изучалось содержание тяжелых металлов в оперении охраняемых видов птиц, например, *Grus monachus*, *Grus vipio*, *Ciconia boyciana*, а также хищников, например, *Asio flammeus*. Определены концентрации тяжелых металлов в перьях птиц отряда воробьинообразных, которые ведут оседлый образ жизни (*Passer montanus*), мигрирующий (*Phylloscopus proregulus*) или являются перелётными птицами (например,

Fringilla montifringilla, *Emberiza rustica*). Это певчие птицы небольшого размера. Среди них встречаются как многочисленные виды, например, *Aegithalos candatus*, *Parus major*, так и достаточно редкие в природе виды, например, *Emberiza rustica*. Различаются птицы кормовой базой: околотовные птицы питаются рыбой, лягушками, моллюсками (*Ciconia boyciana*), а также корневищами тростника (*Grus monachus*, *Grus vipio*), воробьинообразные являются насекомоядными или в пищу могут употреблять насекомых и семена растений.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в перьях птиц, мг/кг

Название птиц	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	Cd
<i>Grus monachus</i> (Temminck, 1835)	214,1	35,4	21,14	2,2	2,1	0,069	0,006
<i>Ciconia boyciana</i> (Swinhoe, 1873)	878,4	223,0	6,34	2,4	2,8	0,139	0,024
<i>Grus vipio</i> (Pallas, 1811)	528,0	85,1	48,10	2,4	2,4	0,096	0,014
<i>Gallinago gallinago</i> (Linnaeus, 1758)	104,7	2,2	6,08	2,4	2,9	0,144	0,048
<i>Turdus naumanni</i> (Temminck, 1820)	47,6	3,4	1,85	2,5	2,5	0,041	0,098
<i>Asio flammeus</i> (Pontoppidan, 1763)	142,7	15,9	8,19	3,6	2,7	0,010	0,053
<i>Poecile palustris</i> (Linnaeus, 1758)	39,1	8,1	5,81	2,6	2,2	0,099	0,032
<i>Spinus spinus</i> (Linnaeus, 1758)	56,0	9,0	6,61	2,8	2,2	0,140	0,038
<i>Emberiza spodocephala</i>	8,5	6,5	6,08	2,6	2,5	0,056	0,004
<i>Phylloscopus fuscatus</i> (Blyth, 1842)	6,6	2,4	4,49	3,7	2,6	0,067	0,030
<i>Passer montanus</i> (Linnaeus, 1758)	70,3	5,8	5,29	2,0	1,7	0,058	0,005
<i>Phylloscopus inornatus</i> (Blyth, 1842)	10,0	6,8	3,44	3,2	2,1	0,135	0,009
<i>Phylloscopus proregulus</i> (Pallas, 1811)	11,6	2,5	8,46	2,2	2,1	0,054	0,041
<i>Aegithalos candatus</i> (Linnaeus, 1758)	8,5	2,9	5,02	1,7	2,2	0,044	0,023
<i>Cyanistes cyanus</i> (Pallas, 1770)	19,0	3,4	3,96	4,0	2,2	0,111	0,004
<i>Tarsiger cyanurus</i> (Pallas, 1773)	69,8	5,7	4,76	2,7	2,2	0,156	0,050
<i>Emberiza pusilla</i> (Pallas, 1776)	23,8	4,2	4,49	3,8	2,2	0,052	0,004
<i>Emberiza rustica</i> (Pallas, 1776)	4,2	3,3	2,91	1,5	1,1	0,038	0,030
<i>Fringilla montifringilla</i> (Linnaeus, 1758)	6,3	2,6	6,34	4,1	1,5	0,148	0,003
<i>Parus major</i> (Linnaeus, 1758)	22,7	3,7	6,61	2,5	2,4	0,032	0,004
<i>Anthus hodgsoni</i> (Richmond, 1907)	72,9	3,8	4,76	4,5	1,8	0,143	0,011
<i>Poecile montanus</i> (Conrad von Balenstein, 1827)	31,2	20,5	2,11	4,2	1,7	0,039	0,043
<i>Picus canus</i> (Gmelin, 1788)	270,1	46,0	37,79	1,6	1,9	0,064	0,043

Наземные птицы мелких размеров больше накапливают свинца по сравнению с околотовными птицами, в перьях которых содержание свинца не превышало 2,4 мг/кг (таблица 1). В оперении некоторых видов птиц было отмечено высокое содержание свинца, которое достигало у *Anthus hodgsoni* 4,5 мг/кг. Каких-то различий в содержании тяжелых металлов в оперении хищников по сравнению с воробьинообразными мы не заметили, возможно, необходимо увели-

читать количество хищников для изучения. Подобные исследования по распространению микроэлементов в перьях птиц были проведены на юге России [1].

Высокие концентрации свинца и кадмия в окружающей среде и их накопление в организме птиц отрицательно влияют на репродуктивную функцию самцов воробьёв, вызывают нарушение уровня репродуктивных гормонов [11]. В воде пойменных озёр Муравьёвского заказника наблюдалось мозаичное загрязнение свинцом. Высокие концентрации свинца были обнаружены в корневищах тростника и в некоторых других растениях, которые являются частью кормовой базы птиц [13].

В оперении птиц в большей степени присутствовало железо, цинк и медь, которые являются биогенными элементами и входят в состав ферментов, гормонов. Формирование микроэлементного состава живых организмов обусловлено физиологической потребностью в элементах, окислительно-восстановительными условиями среды в ходе эволюции биосферы и современными условиями обитания, в том числе воздействием человеческой деятельности.

Заключение. В перьях птиц накапливаются тяжелые металлы, поэтому птицы могут быть использованы в качестве индикаторов для характеристики геохимической обстановки в местах обитания. В перьях птиц Муравьёвского заказника в большей степени накапливались железо, медь, цинк. Содержание тяжелых металлов в перьях птиц можно расположить в порядке уменьшения в ряд $Fe > Zn > Cu > Pb > Ni > Co > Cd$. Мониторинговое исследование окружающей среды Муравьёвского зоологического заказника показало необходимость расширения списка тяжелых металлов для изучения и увеличения количества видов птиц, включая хищников, а также редких и исчезающих видов.

Авторы благодарят Смиренского С.М. за предоставленные образцы перьев птиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lebedeva N.V.* (1997) Accumulation of heavy metals by birds in the Southwest of Russia. Russian Journal of Ecology, Vol. 28, No. 1, pp. 41–46. Translated from Ekologiya, No. 1, pp. 45–50.
2. *Gillet A. – M. T. Y., Seewagen C.L.* (2014) Mercury exposure of a wetland songbird, *Agelaius phoeniceus*, in the New York metropolitan area and its effect on nestling growth rate Environ Monit Assess no.186, pp 4029–4036.
3. *Bichet C, Scheffler R, Cœurdassier M, Julliard R, Sorci G, Loiseau C.* (2013) Urbanization, Trace Metal Pollution, and Malaria Prevalence in the House Sparrow. PLoS ONE no.8(1), pp. e53866.
4. *Pakusina, A., Malinovsky, N., Platonova, T., Parilova, T., Parilov, M., Balan, I.* (2022) Ecological and Chemical Assessment of the Habitats of Cranes in the Khingan State Nature Reserve, Russia. In the collection: Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East. Agricultural Innovation Systems, Volume 1. Ussuriysk. pp. 658–666.
5. *Xu, P., Zhang, X., Zhang, F., Bempah, G., Lu, C., Lv, S., Zhang, W. and Cui, P.* (2020) Use of aquaculture ponds by globally endangered redcrowned crane (*Grus japonensis*) during the wintering period in the Yancheng National Nature Reserve, a Ramsar wetland Global Ecology and Conservation no.23, pp.e01123.
6. *Lukyanova O.N., Tsygankov V.Y., Boyarova M.D., Khristoforova N.K.* Bioaccumulation of HCHs and DDTs in organs of Pacific salmon (genus *Oncorhynchus*) from the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. Chemosphere 2016. no.157, pp. 174–180.
7. *Roman, L., Kastury, F., Petit, S., Aleman, R., Wilcox, C., Hardesty, B. D., Hindell, M.A.* (2020) Plastic, nutrition and pollution; relationships between ingested plastic and metal concentrations in the livers of two *Pachyptila* seabirds. Sci Rep no.10(1), pp. 18023.
8. *Шерхунаев Г.В., Елаев Э.Н.* Содержание тяжелых металлов во внутренних органах некоторых водоплавающих птиц дельты р. Селенги. Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. – 2015. № 4. С. 180–183.

9. Сасин А.А., Пакусина А.П., Малиновский Н.В., Платонова Т.П. Загрязнение тяжелыми металлами среды обитания *Ciconia boyciana* на Зейско-Буреинской равнине, Россия. Амурский зоологический журнал. – 2024. Т. XVI, № 2. С. 363–374.
10. Espin S., Garcia-Fernandez A.J., Herzke D., Shore R.F., Hattum B., Martinez-Lopez E., Coeurdassier M., Eulaers I., Fritsch C., Gomez-Ramirez P., Jaspers V.L.B., Krone O., Duke G., Helander B., Mateo R., Movalli P., Sonne C., Brink N.W. (2016) Tracking pan-continental trends in environmental contamination using sentinel raptors-what types of samples should we use? *Ecotoxicology* 25 (4) 777–801.
11. Ding J., Yang W., Wang S., Zhang H., Yang Y., Bao X. and Zhang Y. (2020) Effects of environmental metal pollution on reproduction of a free-living resident songbird, the tree sparrow (*Passer montanus*) *Science of The Total Environment*. no. 721, pp. 137674.
12. Jaspers V.L.B., Covaci A., Herzke D., Eulaers I., Eens V. (2019) Bird feathers as a biomonitor for environmental pollutants: Prospects and pitfalls. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* no. 118, pp. 223–226.
13. Pakusina A.P., Platonova T.P., Lobarev S.A. and Smirenski S.M. (2018) Chemical and ecological characteristics of lakes located in the Muraviovka Park. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. no. 15 (4). pp 27–34.

Психиатрия и наркология

Кирюхин О.Л., кандидат медицинских наук, доцент

Кирюхина Л.Б., врач-физиотерапевт

Мартынова Е.О., клинический ординатор

Урясьев О.М., доктор медицинских наук, профессор

(Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова Министерства здравоохранения Российской Федерации)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.06

ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕРАПИЯ В ЛЕЧЕНИИ ПСИХИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Одна из целей нейробиологии в изучении работы головного мозга человека - понять нейронные механизмы, лежащие в основе психических заболеваний. Один из центральных вопросов заключается в том, как волновая активность мозга связана с когнитивными и эмоциональными процессами. До настоящего времени большинство доказательств, подтверждающих эту взаимосвязь, носили корреляционный характер. Эта ситуация кардинально изменилась с недавней разработкой методов неинвазивной стимуляции мозга, которые открывают новые перспективы для нейробиологии, позволяя исследователям впервые подтвердить свои корреляционные теории, непосредственно манипулируя функционированием мозга с помощью внешнего воздействия. Одним из методов такого воздействия является транскраниальная электротерапия или, её наиболее часто употребляемый синоним – транскраниальная электростимуляция (ТЭС) – метод электрической стимуляции мозга, при котором токи проникают через неповрежденную кожу головы человека для непосредственного воздействия на электрическую активность головного мозга. Предполагается, что нейронное вовлечение и влияние на нейропластичность опосредуют поведенческие эффекты ТЭС у пациентов с психической патологией. Кроме того, следует сфокусироваться на механистических теориях о взаимосвязи между определенными когнитивными функциями и конкретными параметрами волновой активности мозга, такими как их амплитуда, частота, фаза и фазовая когерентность. Для каждого из этих параметров при их отклонениях от нормальных значений составляется программа электростимуляции, поэтому каждая психическая патология предполагает свой протокол ТЭС. В статье представлено как текущее состояние проблемы, так и описание последних разработок в области ТЭС, которые в современной интерпретации предполагают стимуляцию активности головного мозга модулированными синусоидальными импульсами. Приведены наблюдения онлайн и оффлайн-эффектов применения ТЭС при психических заболеваниях.

Ключевые слова: транскраниальная электростимуляция, физиотерапия, психические заболевания.

Kiryukhin O.L.

Kiryukhina L.B.

Martinova E.O.

Uryasyev O.M.

TRANSCRANIAL ELECTROTHERAPY IN THE TREATMENT OF MENTAL DISEASES

One of the goals in studying the work of the human brain is to understand the neural mechanisms underlying mental illness. One of the central questions is how brain wave activity is related to cognitive and emotional

processes. To date, most of the evidence supporting this relationship has been correlational. This situation has changed dramatically with the recent development of noninvasive brain stimulation techniques that open up new perspectives for neuroscience, allowing researchers to confirm their correlation theories for the first time by directly manipulating brain function through external influences. One of the methods of such exposure is transcranial electrical stimulation (tACS), a method of electrical stimulation of the brain in which currents act on the intact human scalp to directly interfere with the electrical activity of the brain. It is assumed that neural involvement and plasticity mediate the behavioral effects of tACS in patients with mental pathology. In addition, one should focus on mechanistic theories about the relationship between certain cognitive functions and specific parameters of brain oscillations, such as their amplitude, frequency, phase and phase coherence. For each of these parameters, we present both the current state of testing their functional significance using EEG, and a description of the latest developments in the field of tACS, which include stimulation by physiologically conditioned sine waves, stimulation protocols that allow observing online and offline effects of tACS in mental illness.

Keywords: *transcranial electrical stimulation, physiotherapy, mental diseases.*

Современная психиатрия – фундаментальная и активно развивающаяся наука, которая имеет несколько направлений своего развития. Одно из них – создание новых молекул фармакологических средств, оказывающих влияние на патологические состояния, связанные с расстройством психики. За последние 10-15 лет появились новые группы антидепрессантов, группа атипичных нейролептиков, небензодиазепиновые анксиолитики и другие, ещё проходящие испытания лекарственные средства. Их лечебный эффект с каждым поколением имеет всё более целенаправленное действие и всё меньшее количество побочных эффектов. Однако часто именно из-за побочных эффектов их применение больными встречает определённые препятствия. Поэтому поиск альтернативных направлений в лечении расстройств психики сохраняет свою актуальность. Применение методов физиолечения в психиатрии имеет давнюю историю, однако современная физиотерапия существенно изменилась. С появлением новых технологий и аппаратуры изменился взгляд на применение физиолечения в психиатрии. На смену некогда распространённой в лечебной практике электросудорожной терапии пришли методы современной транскраниальной электротерапии, обладающей хорошей переносимостью и минимальным количеством побочных эффектов.

Транскраниальной электротерапией (транскраниальной электростимуляцией) называют дозированное электрическое воздействие через мягкие ткани и кости черепа, направленное на определённые структуры головного мозга с целью получения лечебного эффекта. В зависимости от параметров электротока, она включает в себя ряд методик, отличающихся друг от друга параметрами подаваемого тока. Среди них такие всем известные методики как электросон, транскраниальная электростимуляция, мезодиэнцефальная модуляция, гальванизация головы, транскраниальная микрополяризация, центральная электроанальгезия, и более современные разработки последних лет – динамический электросон и динамическая электростимуляция [1].

Объектом воздействия транскраниальной электротерапии являются кора головного мозга и подкорковые центры регуляции, расположенные в среднем и продолговатом мозге, такие как – ретикулярная формация, чёрная субстанция, хвостатое ядро, лимбические ядра, таламус и гипоталамус. От воздействия на эти структуры ожидают улучшения регуляции функций организма и психической деятельности, улучшения адаптации, снижения восприятия боли, восстановления нарушенных нейронных связей и нормализации процессов, находящихся под контролем подкорковых структур головного мозга.

Поэтому и спектр показаний к транскраниальной терапии широк и разнообразен - от лёгких нарушений сна до тяжёлых депрессивных расстройств с суицидальными тенденциями. Это делает данное направление физиотерапии востребованным и изучаемым [2].

Вместе с ростом интереса к транскраниальным методам электротерапии растёт и производство медицинской аппаратуры для работы в этом направлении. Новые приборы приобретают новые функции - диагностические для более точного подбора резонансных частот, саморегулирующиеся для подстройки под индивидуальные биологические параметры пациента, создаются блоки с биологической обратной связью, где сам больной может участвовать в проводимом лечении.

Всё это требует от врачей психиатров и работников физиоотделений постоянно совершенствоваться в области новых технологий, в том числе и в современной транскраниальной электротерапии, которая давно вышла за рамки привычных нам методик электросонотерапии и гальванизации.

История электротерапии начинается с XVII-XVIII веков. Воздействие электрического тока на головной мозг интересовало исследователей с момента появления первых устройств подачи электричества на физические тела [2]. Первые аппараты электролечения в психиатрии были созданы для получения эффекта электрошока или по-современному определению - электросудорожной терапии, которую использовали для воздействия на буйных больных. Как и в современных конвульсаторах лечебный сигнал электрошока имел форму короткого (около 0,5–1,5 мс) прямоугольного биполярного импульса, силой тока до 550 мА. Импульсы разделялись паузами и следовали в виде коротких серий, вызывая у больных трудно переносимые конвульсии. Суммарный заряд лечебного электровоздействия достигал 80–100 милликулон (мК), что представляло определённую опасность для пациента. Поэтому результаты такого лечения часто приводили к внезапной гибели больных и были опасны даже для самих врачей [3].

С начала XIX века стали предприниматься попытки использования электрического воздействия на мозг с целью получения состояния наркоза, сна или обезболивания, но опыты не привели к получению ожидаемых результатов из-за недостаточности знаний нейрофизиологических механизмов электрического воздействия.

В России первыми предложили использовать электротерапию области головы для обеспечения анальгезии при анестезиологическом пособии в родах в начале XX века. У истоков этих методов стояли такие известные учёные как Л.С. Персианинов, Э.М. Каструбин и Н.Н. Расстригин [4]. Механизм развития анальгетического эффекта в результате электровоздействия они объясняли глубоким торможением или параличом нейронов головного мозга. Было определено, что основными нейротрансмиттерами и нейромодуляторами структур, входящих в антиноцицептивную систему мозга, являются эндорфины и серотонин. Выявлено, что прямая электростимуляция антиноцицептивных структур мозга вызывает, кроме обезболивания, ещё широкую гамму эффектов, характерную для этих веществ и имеющую гомеостатическую направленность.

Первые итоги исследований и результаты первых клинических наблюдений разработанных ими методов транскраниальной электротерапии, электроанальгезии и электростимуляции были обобщены в 1987 году в докладах научнопрактической конференции «Новый метод транскраниального электрообезболивания» [5].

На сегодняшний день продолжают исследования в области применения транскраниальных методов электротерапии. Показания для этих методов физиолечения постоянно расширяются. Так, например, в 2021 году объявлено об эффективности транскраниальной электротерапии в лечении депрессий, обсессивно-компульсивных расстройств, шизофрении и деменции [6], разработаны протоколы по её применению. И электротерапия из пугающей и карающей технологии стала превращаться в метод лечения, улучшающий качество жизни больных с психической патологией [7].

В основе механизма действия ТЭС лежат 4 базисные теории, основу которых заложили российские учёные. Каждая из теорий имеет свои неоспоримые доказательства, на их основе полу-

чены объяснения многим эффектам трансцеребральной электротерапии, где основное значение придаётся нейрорефлекторным, нейрогуморальным, ритмическим и резонанс-образующим факторам.

Первая из них – рефлекторная теория Н.К. Анохина, основанная на учении И.П.Павлова о процессах торможения в головном мозге. Изучая процессы, происходящие в коре головного мозга, Павлов открыл явление «запретительного торможения», возникающего при большом количестве раздражающих импульсов, поступающих в кору головного мозга. Начинаясь в определённой зоне, торможение распространяется по всей коре полушарий головного мозга, становясь разлитым, опускается на подкорковые структуры, вызывая защитную реакцию ЦНС в виде естественного физиологического сна.

Согласно теории И.П. Павлова при перегрузке нервной системы в случаях невротических реакций, психотравм, стрессов происходит перевозбуждение подкорковых центров, передающееся на кору головного мозга, вызывая «вегетативный бунт» и перевозбуждение в центральной нервной системе, что приводит к бессоннице, гипоталамическим и дизэнцефальным синдромам, артериальной гипертензии, нейроциркуляторной дистонии и другим состояниям. В попытках подавить активность подкорковых центров регуляции и распространить торможение на область коры головного мозга в 1949 году российскими учёными Ливенцевым, Гиляровским и Газевым был создан первый аппарат импульсного электровоздействия на ЦНС – «ЭС-1». Первые успешные опыты по наведению сна подтвердили данную теорию.

Вторая теория носит название эндорфиновой. В её основе лежит явление выброса нейрогормонов при воздействии на гипоталамо-гипофизарную область различными раздражителями, в том числе, электротоком. Среди нейропептидов определяющими для терапевтических эффектов электросна являются β -эндорфины [8]. Эти соединения опиоидного ряда оказывают общий седативный, снотворный и сильный обезболивающий эффект. Стабилизируется работа регуляторных вегетативных центров в основном за счёт активации вагусной активности, наступает брадикардия, снижается кашлевой рефлекс, уменьшаются спастические сокращения гладкой мускулатуры, повышается тонус сфинктеров внутренних органов за счёт активации опиоидных рецепторов клеток. В целом при воздействии импульсного тока процедуры электросна наблюдается реакция, напоминающая действие наркотических анальгетиков. В пользу данной теории выступают исследования о нивелировании эффектов электросна при введении налтрексона - антагониста опиоидных рецепторов [9].

Третья теория носит название «теории усвоения ритма». Многочисленные клинические исследования [10] показывают, что для возникновения лечебного эффекта электросна - для гармонизации работы подкорковых центров, для возникновения сноподобного и седативного эффекта, необходимо чтобы ритмичный импульсный ток был «усвоен» подкорковыми центрами и особенно определёнными участками коры головного мозга. В пользу этой теории приводят тот факт, что, при наличии необратимых органических изменений в ЦНС, все методы транскраниального воздействия становятся неэффективны. Наибольшую эффективность методика ТЭС демонстрирует при функционально активной коре головного мозга.

Теория резонансотерапии - наиболее распространена в европейской литературе. В ряде работ [11] было установлено, что максимальный эффект от воздействия импульсного тока - усвоение ритма, выброс эндорфинов, высокая степень седации - возникает на его определённых (резонансных) частотах. Иными словами, для максимальной эффективности процедуры необходимо совпадение собственной частоты работы структур головного мозга с частотой импульсов, т.е. требуется индивидуальный подбор частоты, что применяется в современной аппаратуре для трансцеребральной электротерапии. Так в 2018 году Lu A и соавт. предложили пять различных нейронных механизмов, которые могли бы объяснить клеточные эффекты ТЭС [7]. Во-первых, стохастический резонанс: широкий спектр нейронов под воздействием ТЭС, будут реа-

гировать стохастически на поляризацию или гиперполяризацию. Это приводит к значительному снижению порога возбуждения. Во-вторых, резонанс собственного ритма: это происходит, когда частота ТЭС совпадает с частотой эндогенных колебаний. Волна стимулирующего тока создаёт «резонансную волну» в аналогичной фазе каждого цикла. В-третьих, временное смещение импульсов: время смещения импульсов нейронов регулируется взаимодействием между стимуляцией и торможением внутренними токами, которые могут работать синергически с током, создаваемым электростимуляцией, возбуждая одну и ту же группу нейронов во время каждого цикла стимуляции. В-четвертых, вовлечение сети нейронов, благодаря внешнему току большой амплитудой. Наконец, навязанный шаблон: для преодоления эндогенных регулярных колебаний и введения новых навязанных колебаний ведёт к изменению функционального состояния головного мозга [7].

Большинство аппаратов для проведения процедур транскраниальной электротерапии производят прямоугольные импульсы электрического тока, с напряжением 20–30 В, сила тока не более 10–12 мА, частота следования импульсов 1–200 Гц, длительность импульсов 0,2–2,0 мс. Возможно использование дополнительной постоянной составляющей тока. Основным недостатком монополярного тока является проявление эффектов электролиза, что выражается в болезненности процедур, раздражающем действии на кожу, вызывающем жжение и покраснения в области прилегания электродов. В современных аппаратах («Магنون-СЛИП», «Адаптон-СЛИП», «Элэскулап», «Нейросон») наряду с монополярными импульсами есть возможность использования двуполярных импульсов, снижающих ионнозависимое обрезающее действие кислот и щелочей, что существенно уменьшает раздражение кожи. Кроме того, учитывая сложно модулированный характер собственных биологически активных импульсаций мозга человека, как и всего организма в целом, технические решения, заложенные в данных аппаратах, обеспечивают получение сложно модулированных импульсов, близких к физиологическим биоэлектромагнитным колебаниям. Это достигается, с одной стороны, применением большого числа изменяемых параметров импульсов, таких как полярность, длительность, частота заполнения, частота следования, частотная модуляция, а, с другой стороны, реализацией интерференционных эффектов от двух каналов.

Для более глубокого проникновения и ещё большего преодоления ионозависимого повреждения используются модуляции переменного тока, называемые транскраниальная электростимуляция переменным током (ТЭСПТ).

Синусоидальный переменный электрический ток в этой разновидности электролечения подается на кожу головы и, проникая через мягкие ткани и кости черепа, воздействует в основном на нейроны коры головного мозга. Предполагается, что ТЭСПТ модулирует функции мозга и, особенно гипервозбуждение отдельных структур и когнитивные процессы, вовлекая собственную частоту головного мозга и вызывая долговременную синаптическую пластичность, имитируя своей частотой собственную электрофизиологическую активность головного мозга [11]. В исследованиях было показано, что различные режимы этой активности соответствуют различным функциональным состояниям мозга [7], а связи двух удалённых областей коры головного мозга устанавливаются при синхронизации их электрических колебаний [10]. В этом смысле ТЭСПТ синхронизируя или десинхронизируя их активность может соединять и разъединять эти участки, если от их взаимодействия зависят симптомы психопатологии. Соответственно, ТЭСПТ может представлять собой потенциальный терапевтический инструмент, модифицируя патологически изменённые колебания мозга и паттерны взаимодействия, которые ранее были выявлены при различных психических расстройствах [10].

Много исследований касаются улучшения нейропластичности нейронов под воздействием ТЭСПТ – так называемая, «теория онлайн и офлайн эффектов электростимуляции» [12]. Во время процедуры ТЭСПТ внешний возбуждающий ток заставляет эндогенные

колебания мозга следовать интенсивнее по своей частоте и фазе, «прожигая» застарелые и ослабшие синаптические связи, восстанавливая их активность [13]. При этом воздействие не только действует сиюминутно (онлайн), но и сохраняет долгосрочный положительный эффект (офлайн) [14].

С этой точки зрения можно подчеркнуть уникальные особенности ТЭСПТ как нейромодулятора в отличие от других форм стимуляции головного мозга. Так, например, стимуляция постоянным импульсным током, который используется в аппаратах электросна, активно применяемых в Российской Федерации в 80-х, 90-х годах прошлого столетия, постоянно деполяризует и гиперполяризует нейроны, изменяя потенциал аксональной мембраны, грубо подавляя их спонтанную активность. Современная ТЭСПТ терапия имитирует переменный характер собственной электрической активности мозга.

Типичная методика проведения ТЭСПТ включает в себя наложение электродов на кожу головы, положение и размер которых могут быть изменены для целенаправленного воздействия на определенную область мозга [15]. Для этой цели расположение электродов разрабатывается в соответствии с вычислительными моделями ЭЭГ для оптимизации параметров стимуляции [16]. Кроме того, параметры самого переменного тока могут быть настроены с точки зрения частоты, амплитуды, формы фазы, синхронизации фазы, а также продолжительности и количества сеансов стимуляции в зависимости от психического расстройства, при котором проводится лечение. Частота стимуляции обычно устанавливается по частотам ЭЭГ для модуляции процессов мозга, связанных с ними. Другие параметры могут варьироваться в зависимости от целей электровоздействия и набора симптомов, модуляция которых стала целью проводимого лечения [17].

Одним из показаний к электротерапии современного направления стало старейшее заболевание – шизофрения.

Первый систематический обзор по электролечению шизофрении появился в 2018 году [18]. Авторы доказали эффективность ТЭСПТ как при продуктивных, так и при негативных симптомах заболевания [19]. Предлагаемые параметры переменного тока:

Форма волны стимуляции имеет синусоидальную форму, модулированную частотой 6 или 10 Гц и амплитудой не более 2 мА, формой амплитудной модуляции в виде биполярных импульсов длительностью 1,5–2 мс дали положительный результат в виде снижения интенсивности галлюцинаций и нормализацией аффекта. Расположение электродов – в левой фронтальной области и левой задней теменной области показали наибольшую эффективность [20]. Длительность процедуры – не более 20 минут (начиная с 8 минут с нарастанием продолжительности), количество сеансов по данным различных авторов – от 10 до 20 посещений [21].

Большинство исследователей отмечают не только снижение проявлений галлюцинаций, но и улучшение когнитивной функции у больных шизофренией [22].

Rachel B и Justin Riddle описывают интересный клинический случай по работе с галлюцинациями с помощью ТЭСПТ [23].

Пациентка Б., 35-летняя женщина с диагнозом «шизофрения» больна более 10 лет, находилась на амбулаторном лечении. Относительная ремиссия была достигнута приемом лurasидона в дозе 80 мг в день. Пациентка Б. - одинокая женщина, состоящая в долгосрочных отношениях, и успешный предприниматель. Ее основной жалобой были слуховые галлюцинации враждебного содержания, влияющие на ее способность вести свой бизнес. В её протокол лечения была внесена ТЭСПТ-терапия. Стимуляция проводилась на частоте 10 Гц с синфазностью от нуля до пика 1 мА в левой дорсолатеральной префронтальной коре и височно-теменном соединении с помощью электродов размером 5 × 5 см. Обратный электрод размером 5 × 7 см был сосредоточен на теменной области. Серьезных нежелательных явлений не было, и лечение хорошо переносилось. Пациентка продемонстрировала 100%-ную посещаемость во время всех 20 сеан-

сов. Единственными постоянными побочными эффектами, о которых сообщалось, были преходящие боли в волосистой части головы (60% сеансов), покалывание (60%) и ощущение жжения (55%) в местах расположения электродов во время процедуры.

После каждого сеанса обученный исследовательский персонал проводил и оценивал шкалу оценки слуховых галлюцинаций (AHRs), пациентка вела дневник на протяжении всего исследования, которым она поделилась с исследователями. По итогам лечения частота появления галлюцинаций снизилась более чем в два раза, а характер галлюцинаций стал носить ненавязчивый «посторонний» характер [23].

В лечении **депрессии** применение ТЭС имеет хорошую доказательную базу. В двойном слепом рандомизированном клиническом исследовании ТЭСПТ была нацелена на патологически повышенные альфа-волны в левой лобной области по сравнению с правой лобной областью. Целью исследования было восстановление лобных альфа-колебаний путем синхронной стимуляции обеих лобных областей. Частота модулированных колебаний составила от 10 до 40 Гц с амплитудой 4 мА силой тока не более 2 мА. Сеансы длились 40 минут в течение пяти дней подряд. Целевой областью стимуляции была левая лобная зона коры головного мозга. Через 4 недели лечения наблюдалась нормализация альфа-колебаний, шкала оценки депрессии Гамильтона (HDRS) и опросник депрессии Бека (BDI) показали улучшение на 20-28%, особенно у пациентов с используемой частотой – 10 Гц. Более того, при опросе испытуемых не было серьезных побочных эффектов, маниакального сдвига или индукции суицидальных мыслей [24].

Обсессивно-компульсивное расстройство (ОКР) даёт хороший ответ на Транскраниальную электростимуляцию. Предлагаемые параметры: синусоидально модулированный ток частотой 40 Гц, направленный на обе височные области, длительностью сеанса 20 минут 2-3 раза в неделю на протяжении семи недель. Все пациенты были клинически оценены с помощью шкалы обсессивно-компульсивных расстройств Йеля-Брауна (YBOCS) и клинической глобальной шкалы впечатлений (CGI) за 1 день до стимуляции ТЭСПТ, а также 28 и 56 дней спустя. Три пациента наблюдались в течение 1 года. Симптомы улучшились у всех пациентов, и улучшение продолжалось на протяжении всего периода наблюдения [25]. Исследование успешно уменьшило клинические симптомы ОКР, открыв дверь для дальнейших исследований ТЭСПТ при ОКР.

При **биполярном расстройстве (БПР)**, как правило, альфа-колебания оказываются подавленными, а тета- и дельта- колебательная активность усиливается [26]. Аналогичным образом, было зарегистрировано усиление реакции бета-мощности на различные стимулы, что дифференцировало биполярное расстройство от шизофрении. Таким образом, колебательные изменения при биполярном расстройстве ограничивают альфа-волны, связанные с состоянием покоя, а также бета-и гамма-синхронизацию, что приводит к ограничению связи между областями мозга. Эти два основных открытия могут объяснить нарушения: скачущие мысли и отвлекаемость у пациентов с БПР, и ТЭСПТ может быть нацелена на их нормализацию. Но до сих пор, согласно систематическому поиску, не было зарегистрировано ни одного клинического исследования, изучающего роль ТЭС при биполярном расстройстве.

В одном исследовании проводилась направленная ТЭСПТ-терапия у пациентов с **Синдромом дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ)**. При СДВГ целевая амплитуда, определяемая по ЭЭГ, демонстрирует некоторое снижение, что связано с типичным дефицитом когнитивных функций при СДВГ. Таким образом, в исследовании ТЭСПТ использовали для стимуляции этой активности – на улучшение когнитивных функций за счет такого усиления амплитуды собственной активности зон коры головного мозга. Во время выполнения процедуры, посредством наложения электродов на центральную, теменную и височную доли в течение 20 минут мощность переменного тока не должна превышать 1 мА. Время и частота стимуляции были персонализированы таким образом, чтобы пики стимуляции могли совпадать

с пиками колебаний на ЭЭГ этого пациента. Исследование показало, что суммарная амплитуда по ЭЭГ была значительно увеличена, что сопровождалось улучшением поведения при выполнении точных задач. О серьезных побочных явлениях не сообщалось [27].

На сегодняшний день изучение ТЭС-терапии активно продолжается. Появляются протоколы лечения деменции, панических состояний и аутизма. Растёт количество предлагаемой на медицинском рынке техники для транскраниальной стимуляции головного мозга. Укрепляется осведомлённость медицинского персонала об альтернативных методах лечения в психиатрии в связи с растущей потребностью в этом у пациентов. И в недалёком будущем у ТЭС-терапии есть невероятные шансы быть включённой в стандарты лечения психических заболеваний ввиду своей эффективности и доказанной безопасности.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимов Г.А., Заболотных В.А., Лебедев В.П.* Транскраниальное электровоздействие в лечении вегетососудистой дистонии. Журн. невропатол. и психиат. 1991; 91 (7): 75–8 [Akimov G.A., Zabolotnykh V.A., Lebedev V.P. Transkraniál'noye elektrovozdeystviye v lechenii vegetososudistoy distonii. Zhurn. nevropatol. i psikhiatr. 1991; 91 (7): 75–8 (in Russ.)].
2. *Сапего И.А., Лукомский И.В., Пашков А.А.* Транскраниальная электростимуляция как метод физиотерапевтической коррекции психосоматических расстройств астенического круга. В сб.: Достижения фундамент., клин. мед. и фармации. Мат. 69-й научн. сессии сотрудников университета. УО «Витебский государственный медицинский университет», 2014; 356–7 [Sapego I.A., Lukomskiy I.V., Pashkov A.A. Transkraniál'naya elektrostimulyatsiya kak metod fizioterapevticheskoy korrektsii psikhosomaticheskikh rasstroystv astenicheskogo kruga. In: Dostizheniya fundamental'noy, klinicheskoy meditsiny i farmatsii Materialy 69-oy nauchnoy sessii sotrudnikov universiteta. UO «Vitebskiy gosudarstvennyy meditsinskiy universitet», 2014; 356–7 (in Russ.)].
3. *Нельсон А.И.* Электросудорожная терапия в психиатрии, наркологии и неврологии. М: БИ-НОМ. Лаборатория знаний. 2005. 368 с. ISBN 5-94774-249-7.
4. *Персианинов Л.С., Каструбин Э.М., Расстригин Н.Н.* Электроаналгезия в акушерстве и гинекологии / М.: Медицина, 1978; 239 с. [Persianinov L.S., Kastrubin E.M., Rasstrigin N.N. Elektroanal'geziya v akusherstveiginekologii / М.: Meditsina, 1978; 239 p. (in Russ.)].
5. *Айрапетов Л.Н., Зайчик А.Н., Трухманов Н.С. и др.* Об изменении уровня β-эндорфина в мозге и спинномозговой жидкости при транскраниальной электроаналгезии. Физиол. журн. СССР. – 1985, 71 (1): 56–64 [Ayrapetov L.N., Zaychik A.N., Trukhmanov N.S. et al. Ob izmenenii urovnya p-endorfina v mozge i spinnomozgovoy zhidkosti pri transkraniál'noy elektroanal'gezii. Fiziol. zhurn. SSSR. 1985; 71 (1): 56–64 (in Russ.)].
6. *Elyamany O, Leicht G, Herrmann CS, Mulert C.* Transcranial alternating current stimulation (tACS): from basic mechanisms towards first applications in psychiatry. Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci. 2021 Feb;271(1):135-156. doi: 10.1007/s00406-020-01209-9.
7. *Liu A, Vöröslakos M, Kronberg G, Henin S, Krause MR, Huang Y, Opitz A, Mehta A, Pack CC, Krekelberg B, Berényi A, Parra LC, Melloni L, Devinsky O, Buzsáki G.* Immediate neurophysiological effects of transcranial electrical stimulation. NatCommun. 2018; Nov 30;9(1):5092. doi: 10.1038/s41467-018-07233-7.
8. *Голиков А.П., Павлов В.А., Карев В.А. и др.* Влияние транскраниальной электростимуляции опиоидных систем на репаративные процессы у больных инфарктом миокарда // Кардиология. 1989; 29 (12): 45–8 [Golikov A.P., Pavlov V.A., Karev V.A. et al. Vliyaniye transkraniál'noy

- elektrostimulyatsii opioidnykh sistem na reparativnyye protsessy u bol'nykh infarktom miokarda // *Kardiologiya*. 1989; 29 (12): 45–8 (in Russ.).]
9. *Енин Л.Д., Акоев Г.Н., Лебедев В.П. и др.* Воздействие опиоидных пептидов мозга на сенсорные окончания кожи как один из механизмов анальгетического эффекта. В кн.: Климов П.К., отв. ред. Физиологическое и клиническое значение регуляторных пептидов: Тез. докл. / Пушино, 1990; 55 [Yenin L.D., Akoyev G. N., Lebedev V.P. et al. Vozdeystviye opioidnykh peptidov mozga na sensorynye okonchaniya kozhi kak odin iz mekhanizmov anal'geticheskogo effekta. In: Klimov P.K. otv. red. Fiziologicheskoye i klinicheskoye znacheniye regulatorynykh peptidov: Tezdokl. / Pushchino, 1990; 55 (in Russ.)].
 10. *Фомичев Е.В., Яковлев А.Т., Подольский В.В. и др.* Комплексное лечение открытых переломов нижней челюсти с применением транскраниальной электростимуляции. Волгоградский научно-мед. журнал. 2010; 1 (25): 40–4 [Fomichev Ye.V., Yakovlev A.T., Podolsky V. V. et al. Transcranial electrostimulation in complex treatment of the open fractures of the mandible. Volgogradskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal. 2010; 1 (25): 40–4 (in Russ.)].
 11. *Antal A, Paulus W.* Transcranial alternating current stimulation (tACS). *FrontHumNeurosci*. 2013 Jun28;7:317. doi: 10.3389/fnhum.2013.00317.
 12. *Bikson M, Inoue M, Akiyama H, Deans JK, Fox JE, Miyakawa H, Jefferys JG.* Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *J Physiol*. 2004 May 15;557(Pt 1):175-90. doi: 10.1113/jphysiol.2003.055772.
 13. *Ali MM, Sellers KK, Fröhlich F.* Transcranial alternating current stimulation modulates large-scale cortical network activity by network resonance. *J Neurosci*. 2013 Jul 3;33(27):11262-75. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5867-12.2013.
 14. *Kasten FH, Dowsett J, Herrmann CS.* Sustained Aftereffect of α -tACS Lasts Up to 70 min after Stimulation. *FrontHumNeurosci*. 2016; May25;10:245. doi: 10.3389/fnhum.2016.00245.
 15. *Schestatsky P, Morales-Quezada L, Fregni F.* Simultaneous EEG monitoring during transcranial direct current stimulation. *J VisExp*. 2013 Jun 17;(76):50426. doi: 10.3791/50426.
 16. *Woods AJ, Antal A, Bikson M, Boggio PS, Brunoni AR, Celnik P, Cohen LG, Fregni F, Herrmann CS, Kappenman ES, Knotkova H, Liebetanz D, Miniussi C, Miranda PC, Paulus W, Priori A, Reato D, Stagg C, Wenderoth N, Nitsche MA.* A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clin Neurophysiol*. 2016 Feb;127(2):1031-1048. doi: 10.1016/j.clinph.2015.11.012. Epub 2015 Nov 22. PMID: 26652115; PMCID: PMC4747791.
 17. *Vosskuhl J, Strüber D, Herrmann CS.* Non-invasive Brain Stimulation: A Paradigm Shift in Understanding Brain Oscillations. *FrontHumNeurosci*. 2018 May25;12:211. doi: 10.3389/fnhum.2018.00211.
 18. *Mellin JM, Alagapan S, Lustenberger C, Lugo CE, Alexander ML, Gilmore JH, Jarskog LF, Fröhlich F.* Randomized trial of transcranial alternating current stimulation for treatment of auditory hallucinations in schizophrenia. *Eur Psychiatry*. 2018 Jun;51:25-33. doi: 10.1016/j.eurpsy.2018.01.004.
 19. *Sreeraj VS, Suhas S, Parlikar R, Selvaraj S, Dinakaran D, Shivakumar V, Narayanaswamy JC, Venkatasubramanian G.* Effect of add-on transcranial alternating current stimulation (tACS) on persistent delusions in schizophrenia. *PsychiatryRes*. 2020 Aug;290:113106. doi: 10.1016/j.psychres.2020.113106.
 20. *Sreeraj VS, Shivakumar V, Sowmya S, Bose A, Nawani H, Narayanaswamy JC, Venkatasubramanian G.* Online Theta Frequency Transcranial Alternating Current Stimulation for Cognitive Remediation in Schizophrenia: A Case Report and Review of Literature. *J ECT*. 2019 Jun;35(2):139-143. doi: 10.1097/YCT.0000000000000523.
 21. *Zhang R, Ren J, Zhang C.* Efficacy of transcranial alternating current stimulation for schizophrenia treatment: A systematic review. *J Psychiatr Res*. 2023 Dec;168:52-63. doi: 10.1016/j.jpsychires.2023.10.021.
-

22. *Biačková N, Adamová A, Klírová M.* Transcranial alternating current stimulation in affecting cognitive impairment in psychiatric disorders: a review. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci.* 2024 Jun;274(4):803-826. doi: 10.1007/s00406-023-01687-7.
23. *Rachel B. Force, Justin Riddle, L. Fredrik Jarskog, Flavio Fröhlich.* A case study of the feasibility of weekly tACS for the treatment of auditory hallucinations in schizophrenia. *Brain Stimulation.* 2021; Volume 14, Issue 2: 361-363, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.01.014>.
24. *Alexander ML, Alagapan S, Lugo CE, Mellin JM, Lustenberger C, Rubinow DR, Fröhlich F.* Double-blind, randomized pilot clinical trial targeting alpha oscillations with transcranial alternating current stimulation (tACS) for the treatment of major depressive disorder (MDD). *Transl Psychiatry.* 2019 Mar 5;9(1):106. doi: 10.1038/s41398-019-0439-0.
25. *Klimke A, Nitsche MA, Maurer K, Voss U.* CaseReport: Successful Treatment of Therapy-Resistant OCD With Application of Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS). *Brain Stimul.* 2016 May-Jun;9(3):463-465. doi: 10.1016/j.brs.2016.03.005.
26. *Ozerdem A, Güntekin B, Tunca Z, Başar E.* Brain oscillatory responses in patients with bipolar disorder manic episode before and after valproate treatment. *Brain Res.* 2008 Oct15;1235:98-108. doi: 10.1016/j.brainres.2008.06.101.
27. *Dallmer-Zerbe I, Popp F, Lam AP, Philipsen A, Herrmann CS.* Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) as a Tool to Modulate P300 Amplitude in Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD): Preliminary Findings. *Brain Topogr.* 2020 Mar;33(2):191-207. doi: 10.1007/s10548-020-00752-x.

Фармакология, клиническая фармакология

Меджидова К.К.

Магомедова Р.М.

Багомедова М.Б.

Чижиков А.А.

Алхазова Р.Т., кандидат медицинских наук, доцент

(Дагестанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации)

ОЦЕНКА АНАЛЬГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ТРИЦИКЛИЧЕСКОГО АНТИДЕПРЕССАНТА У ПАЦИЕНТОВ С ХРОНИЧЕСКОЙ НЕСПЕЦИФИЧЕСКОЙ БОЛЬЮ В ПОЯСНИЦЕ

Боль в спине является одним из центральных вопросов современного здравоохранения. Главная проблема заключается в частой потере трудоспособности взрослого населения и инвалидизации, которые связаны с тенденцией к хронизации болевого синдрома. Высокая распространенность ассоциирована с особенностями образа жизни современного человека.

На сегодняшний день имеется множество схем лечения боли в спине. Центральными остаются физиотерапевтические методы и реабилитация. Однако перечисленные мероприятия необходимо проводить вне периода обострения. Для уменьшения интенсивности боли используют фармакотерапию. Наиболее популярными препаратами являются нестероидные противовоспалительные средства, доказавшие высокую эффективность в большом количестве клинических исследований. Однако их неоднозначный профиль безопасности требует от здравоохранения поиска новых схем лечения. Отличной альтернативой могут стать трициклические антидепрессанты, обладающие анальгетическим эффектом.

В данной работе мы попытались сопоставить эффективность применения противовоспалительных препаратов и антидепрессантов у пациентов с обострением хронической боли в пояснице.

Ключевые слова: люмбагия, НПВП, дулоксетин, целекоксиб, реабилитация, боль в спине.

Medzhidova K.K.

Magomedova R.M.

Bagomedova M.B.

Chizhikov A.A.

Alkhazova R.T.

EVALUATION OF THE ANALGESIC EFFECT OF TRICYCLIC ANTIDEPRESSANT IN PATIENTS WITH CHRONIC NONSPECIFIC LOWER BACK PAIN

Back pain is one of the central issues of modern healthcare. The main problem is the frequent disability of the adult population and disability, which are associated with a tendency to chronic pain syndrome. The high prevalence is associated with the peculiarities of the lifestyle of a modern person.

To date, there are many treatment regimens for back pain. Physiotherapy and rehabilitation remain central. However, these measures must be carried out outside the period of exacerbation. Pharmacotherapy is used to reduce the intensity of pain. The most popular drugs are nonsteroidal anti-inflammatory drugs, which have proven to be highly effective in a large number of clinical studies. However, their ambiguous safety profile requires healthcare to find new treatment regimens. Tricyclic antidepressants with analgesic effect can be an excellent alternative.

In this paper, we tried to compare the effectiveness of anti-inflammatory drugs and antidepressants in patients with exacerbation of chronic low back pain.

Keywords: *lumbalgia, NSAIDs, duloxetine, celecoxib, rehabilitation, back pain.*

Введение

Хроническая боль в спине - одна из самых распространённых проблем современного человека. По некоторым данным до 50% всех жалоб на приеме у врача приходится на боль, половина из которых – болевой синдром в спине [1]. При этом чаще всего боль локализуется в районе поясницы. Причиной тому могут стать длительные статическими нагрузки и сидячий образ жизни. Кроме того, сгибания и скручивания в пояснице также могут быть ассоциированы с появлением и усилением боли [3].

Часто боль в спине приобретает хроническое течение, выступая причиной потери трудоспособности населения и его инвалидизации, что, несомненно, наносит огромный экономический ущерб государству [2].

Выделяют специфические и неспецифические причины, которые могут вызывать боль в спине. К первым относят новообразования [7], травмы, постинфекционные состояния, аутоиммунные заболевания. При неспецифической боли источником могут выступать межпозвоночные диски и окружающие мягкие ткани, но точно указать на источник ноцицептивной импульсации, как правило, невозможно [4, 5].

В лечении неспецифической боли в пояснице ведущее место занимают лечебная физкультура и физиотерапевтические методы [6]. Для купирования болевого синдрома используются анальгетики из различных групп [8]. Наиболее предпочтительными являются нестероидные противовоспалительные препараты (НПВП), которые обладают высокой эффективностью, хотя нередко вызывают нежелательные явления со стороны желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы [10]. При их неэффективности нередко прибегают к помощи трициклических антидепрессантов [9]. Особенно это касается хронической боли в спине, которая включает не только органический, но и психический компонент, формирующийся ввиду длительного ограничения привычной жизни больного.

Цель исследования

Изучить эффективность использования трициклических антидепрессантов у пациентов с хронической неспецифической болью в пояснице, а также сопоставить их влияние на интенсивность болевого синдрома и физическую функцию с эффектами НПВП.

Материалы и методы

В ходе работы был проведен ретроспективный анализ схем лечения 62 пациентов с обострением хронического болевого синдрома в нижней части спины, которые отбирались согласно критериям включения: наличие длительного анамнеза скелетно-мышечной боли в нижней части спины (>6 месяцев); отсутствие специфических причин болевого синдрома (злокачественные новообразования, травмы спины, инфекционные заболевания и др.); отсутствие хронических заболеваний (ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия II степени и выше, перенесенные сосудистые события). Пациенты не включались в выборку, если в течение 2 недель до начала лечения принимали какие-либо препараты с анальгетическим эффектом.

Конечными точками служили интенсивность боли, оцениваемая с помощью визуальной аналоговой шкалы (ВАШ) в динамике, а также данные, полученные путем анкетирования пациентов до лечения и после его окончания с помощью вопросника Освестри (ВО).

Все участники выборки были разделены на 2 группы. В первой (n=34) пациенты принимали целекоксиб 400 мг в первый день (в 2 приема) и 200 мг 1 раз в сутки утром весь остальной период лечения. Во второй группе (n=28) больные принимали дулоксетин 60 мг 1 раз в сутки.

Данные шкал и опросников собирались через 21 день после начала лечения. На протяжении терапии велись дневники, в которых отмечались субъективные ощущения пациентов.

Результаты

Таблица 1

Интенсивность боли по ВАШ

	Первая группа	Вторая группа
Исходный уровень, мм	74,2±7,3	76,5±6,8
Конец терапии, мм	29,4±4,9	28,1±5,6

Каждый показатель представлен в виде среднего значения и его стандартного отклонения.

Интенсивность боли до начала лечения в первой группе составила 74,2±7,3 мм, во второй - 76,5±6,8. После трехнедельного приема препаратов выраженность болевого синдрома была равна 29,4±4,9 в группе целекоксиба и 28,1±5,6 в группе дулоксетина. В группе антидепрессанта пациенты отмечали более позднее возникновение обезболивающего эффекта (к началу третьей недели терапии), тогда как седативный эффект наблюдался почти сразу у 39% опрошенных.

Таблица 2

Влияние на физическую функцию по Освестри

	Первая группа	Вторая группа
Исходный уровень, %	70,3±6,1	72,7±6,8
Конец терапии, %	24,6±4,7	27,3±5,1

Каждый показатель представлен в виде среднего значения и его стандартного отклонения.

В ходе анкетирования, проведенного до начала лечения, в первой группе показатели составили 70,3±6,1, во второй группе - 72,7±6,8. К концу терапии показатели составили 24,6±4,7 и 27,3±5,1 в группе противовоспалительного препарата и антидепрессанта соответственно. Не было выявлено достоверной разницы в эффективности применения того или иного препарата.

Выводы

В ходе исследования не было выявлено достоверных различий во влиянии целекоксиба и дулоксетина на интенсивность болевого синдрома у пациентов с хронической неспецифической болью в нижней части спины. В группе антидепрессанта больные отмечали более позднее наступление анальгетического эффекта, однако к третьей неделе показатели конечных точек оказались сопоставимы. Дулоксетин может быть эффективен при лечении хронической скелетно-мышечной боли в пояснице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яхно Н.Н., Кукушкин М.Л., Чурюканов М.В., Сыровегин А.В. Результаты открытого мультицентрового исследования «МЕРИДИАН» по оценке распространенности болевых синдромов в амбулаторной практике и терапевтических предпочтений врачей. // Российский журнал боли. 2012;3(36-37): 10-4.

2. Wu A, March L, Zheng X, et al. Global low back pain prevalence and years lived with disability from 1990 to 2017: estimates from the Global Burden of Disease Study 2017. *Ann Transl Med.* 2020;8(6):299. doi:10.21037/atm.2020.02.175
3. Balagué, F., Mannion, A. F., Pellisé, F., & Cedraschi, C. (2012). Non-specific low back pain. *Lancet* (London, England), 379(9814), 482–491. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60610-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60610-7)
4. Cheung KM, Karppinen J, Chan D, et al. Prevalence and pattern of lumbar magnetic resonance imaging changes in a population study of one thousand forty-three individuals. *Spine* (Phila Pa 1976) 2009; 34: 934–40.
5. de Schepper EI, Damen J, van Meurs JB, et al. The association between lumbar disc degeneration and low back pain: the influence of age, gender, and individual radiographic features. *Spine* (Phila Pa 1976) 2010; 35: 531–36.
6. Wirth, B., & Schweinhardt, P. (2024). Personalized assessment and management of non-specific low back pain. *European journal of pain* (London, England), 28(2), 181–198. <https://doi.org/10.1002/ejp.2190>
7. Deyo RA, Diehl AK. Cancer as a cause of back pain: frequency, clinical presentation, and diagnostic strategies. *J Gen Intern Med* 1988; 3: 230–38.
8. Machado, L. A., Kamper, S. J., Herbert, R. D., Maher, C. G., & McAuley, J. H. (2009). Analgesic effects of treatments for non-specific low back pain: a meta-analysis of placebo-controlled randomized trials. *Rheumatology* (Oxford, England), 48(5), 520–527. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/ken470>
9. Staiger, T. O., Gaster, B., Sullivan, M. D., & Deyo, R.A. (2003). Systematic review of antidepressants in the treatment of chronic low back pain. *Spine*, 28(22), 2540–2545. <https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000092372.73527.BA>
10. Domper Arnal, M. J., Hijos-Mallada, G., & Lanas, A. (2022). Gastrointestinal and cardiovascular adverse events associated with NSAIDs. *Expert opinion on drug safety*, 21(3), 373–384. <https://doi.org/10.1080/14740338.2021.1965988>

Науки о Земле
и окружающей среде

Общая и региональная геология.
Геотектоника и геодинамика

Митрохин А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Уткин В.П., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Неволин П.Л., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

(Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.07

**СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАЛИЯ НА ПРЕДУДНОМ ЭТАПЕ
ФОРМИРОВАНИЯ КОМСОМОЛЬСКОГО РУДНОГО РАЙОНА**

Рассматриваются структурно-геодинамические характеристики пространственного распределения первичных ореолов рассеяния калия (K_2O) в Комсомольском рудном районе (КРР) на основе результатов геохимического картирования проявлений K_2O на уровне фоновых (кларковых) содержаний в породах района, которые отвечают предрудному этапу развития КРР.

Ключевые слова: ореолы рассеяния, Комсомольский рудный район, металлогения, левые сдвиги, складчатые сооружения.

Mitrokhin A.N.

Utkin V.P.

Nevolin P.L.

**STRUCTURAL-DYNAMIC AND GEOCHEMICAL ASPECTS
FOR POTASSIUM SPATIAL DISTRIBUTION AT THE PRE-ORE FORMATION STAGE
OF THE KOMSOMOLSK ORE DISTRICT**

The paper considers structural-and-geodynamic features for a spatial distribution of the potassium (K_2O) primary dissemination aureoles within the Komsomolsk ore district (KOD) according to the results of geochemical mapping for potassium occurrences at the level of background (clarke) K_2O concentrations in the regional rock formations, which correspond to a pre-ore stage of the KOD development.

Keywords: dissemination aureoles, Komsomolsk ore district, metallogeny, sinistral faults, folded structures.

Комсомольский рудный район (КРР) расположен на западной окраине северной части Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы в зоне сочленения Баджальской и Горинской структурно-формационных зон [2–8 и др.]. Он был сформирован в период меловой (K_1a – K_2km)

тектономагматической активизации. Верхи его разреза слагают апт-кампанские (K_1a-K_2km) эпиконтинентальные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы кислого (холдаминская свита, K_1a-K_2t) и среднего (амутская свита, K_2t-km) состава. Эти породы перекрывают с резким угловым и азимутальным несогласием верхнетриасово-валанжинское (T_3-K_1v) кремнисто-терригенное основание. Чехол и основание последовательно прорваны K_1al-K_2km интрузиями пурильского→силинского→чалбинского комплексов мяочанской серии (рис. 1). Стратифицированные и интрузивные образования рассекаются линейными или (реже) трубообразными телами кварц-турмалиновых метасоматитов, к которым приурочено большинство оловорудных месторождений и проявлений КРР [2–8 и др.]. Магматизм (с сопутствующими проявлениями про- и регрессивного метаморфизма) и рудоотложение протекали на фоне левосторонней активизации ССВ ($5-25^\circ$) разломов Комсомольской сдвиговой зоны (КСЗ) под действием ССЗ ($340-350^\circ$) сжатия. КСЗ в совокупности с синедвиговыми СВ–ВСВ складчатыми структурами и СЗ, ВСВ и СВ разломами предопределила особенности локализации проявлений указанных вещественных комплексов [7–8 и др.].

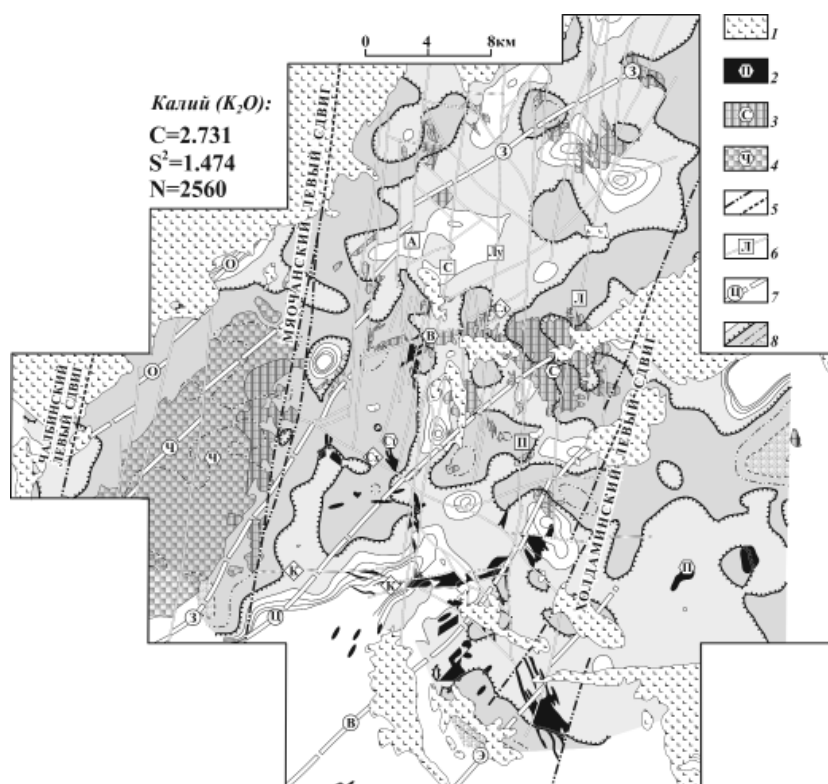


Рис. 1. Распределение первичных литогеохимических ореолов рассеяния калия в пределах КРР (с тектоническими элементами): C – площадной кларк K_2O (%); S^2 – площадная дисперсия содержаний K_2O , N – количество проб. 1 – $N-Q$ покровы базальтов и долеритов; 2–4 – K_1al-K_2km интрузии: пурильские гранодиоритовые (2), силинские монзонитоидные (3) и чалбинские гранитные (4) [Чалбинская (Ч), Силинская (С), Верхне-Силинская (В), Сектахская (Ст), Пурильская (П)]; 5 – главные левые сдвиги КСЗ и их перекрытые звенья (пунктир); 6 – дочерние сдвиги КСЗ [А – Амутский, С – Солнечный, Лу – Лучистый, П – Перевальненский, Л – Левобережный] и сопряженные разломы [К – Курмиджинский, Сх – Сектахский, Сл – Силинский]; 7 – оси главных наложенных K_1a-K_2km антиклиналей: Ч – Чалбинской, Ц – Центральной, Э – Элиберданской; синклиналей: О – Огненской, З – Западной, В – Восточной; 8 – нормированные изоконцентрации K_2O , C_k' : -4 – -3 – -2 – -1 – 0 (ужирнено с бергитрихами) – +1 – 2 – 3 – 4, шкала логарифмическая: $C_k' = \log_f(C_k/C)$, где C_k и C_k' – абсолютные (%) и нормированные по C значения K_2O , $f=1.618034...$; интервалы -1 – 0 – 2 – >2 затушеваны

Рассматриваются итоги избирательного картирования первичных литогеохимических ореолов рассеяния калия (в пересчете на K_2O) на уровне его «фоновых» (кларковых) содержаний в породах КРР [6]. Это соответствует предрудному этапу формирования КРР, который остается наименее изученным в сравнении с предшествующим магматическим и последующим рудным этапами [6]. Съемка производилась с сетью опробования 2500×50 м с учетом состава пород и степени их вторичных изменений [6]. В опробование не вовлекались участки, которые расположены в зонах влияния наложенных кварцевых турмалинитов и калиевых метасоматитов, несущих в себе четкие признаки аномально интенсивного привноса/выноса вещества и метасоматического преобразования вмещающего субстрата [3, 6]. Отобранные на калий пробы (всего – 2560) были проанализированы с помощью количественного химического анализа в лабораториях ДВГИ ДВО РАН [6]. Карта K_2O изоконцентраций (рис. 1) построена с помощью интерполятора Surfer (актуальная версия – **28.0.171** [Golden Software Inc., 2024]). Построение карты осуществлялось с учетом указанной густоты сети опробования и статистических параметров площадного распределения концентраций K_2O (кларка и дисперсии). Для того чтобы выделить наиболее статистически значимые аномалии, K_2O изоконцентрации нормировались по его площадному кларку.

Статистические параметры (рис. 1, табл. 1) свидетельствуют, что территория КРР характеризуется в целом концентрациями калия, близкими к фоновым или ниже. Кларки K_2O для структурно-вещественных комплексов района составляют 0.62–1.08 от стандартных значений (в среднем – $\Sigma(c_i/c_i^r) \times (c_i/C)/6 = 0.96$ при площадном кларке $C = 2.731\%$). Доли (Q_i) каждого из комплексов в площадном кларке C распределяются следующим образом: амутская свита $Q_a = 0.11C$, холдаминская свита $Q_x = 0.13C$, терригенное основание $Q_t = 0.19C$, пурильский комплекс $Q_n = 0.10C$, силинский $Q_c = 0.17C$, чалбинский $Q_{\text{ч}} = 0.30C$. Площадное распределение K_2O – неравномерное (коэффициент вариации – 44.45%), с контрастностью его плюсовых аномалий 2С–4С.

Таблица 1

Нормированные статистические характеристики распределения K_2O в структурно-вещественных комплексах КРР

Структурно-вещественный комплекс	c_i/c_i^r	c_i/C	s_i^2/S^2
Амутская свита	0.79	0.80	1.20
Холдаминская свита	0.71	1.04	0.52
Терригенное основание	1.06	1.06	1.72
Чалбинский гранитный комплекс	1.08	1.60	0.88
Силинский монзонитоидный комплекс	0.99	1.00	0.81
Пурильский гранодиоритовый комплекс	0.62	0.91	0.38

Примечание: c_i^r , c_i и s_i^2 соответственно стандартный кларк K_2O (из [1]), кларк и дисперсия по K_2O для каждого комплекса (из [6]); C и S^2 соответственно площадные кларк и дисперсия K_2O (см. рис. 1).

Несмотря на то что приведенные статистические характеристики кларкового K_2O близки к норме, узор его изоконцентраций (рис. 1) четко коррелирует с архитектурой синсдвигового разломно-складчатого ансамбля КРР и особенностями локализации магматических пород мяочанской серии.

Так, наибольшие в плане ареалы высоких концентраций K_2O тяготеют к замкам и крыльям Чалбинского (в особенности) и Центрального антиклинальных выступов 1-го порядка, сопряженных с ССВ левыми сдвигами КСЗ (как материнскими, так и дочерними) (рис. 1), включая зоны

динамического влияния материнских разломов. Красноречивый пример тому – область с практически нацело плюсовым K_2O между Чалбинским и Силинским сдвигами с почти «осевым» Мяочанским в эндо- и экзоконтактах выходов Чалбинского гранитного и Силинского монцитонитоидного батолитов. Последние приурочены, напомним, к сводам, соответственно, Чалбинского и Центрального выступов, смежных с запада и востока с Западным синклинальным прогибом основания, компенсированным в низах разреза отложениями холдаминской свиты. Эта ситуация позволяет конкретизировать то, что основными источниками привноса фонового калия в КРР являлись прежде всего чалбинские граниты ($Q_{\text{ч}}=0.30C$). Отчасти – это также кислые разности силинских монцитонитоидов ($Q_{\text{с}}=0.17C$), в т. ч. «анаджаканские граниты», лежащие на восточном крыле Чалбинского поднятия/батолита (вблизи Мяочанского сдвига) с уходом далее в подошву Силинского батолита и под Западный прогиб. В последнем источники поступления и аккумуляции K_2O – это слагающие ее низы риолиты и риодациты холдаминской свиты ($Q_{\text{х}}=0.13C$). Нельзя не упомянуть в этом смысле здесь и богатые калием продукты прогрессивного (реликты биотитов, окаймляющие чалбинские граниты) и регрессивного (штокверковые образования хлоритовой субфации альбит-эпидотовой фации) контактового метаморфизма [3]).

Получается, что холдаминская свита, будучи ограниченной снизу интенсивными субпослойными надвиговыми срывами-экранами (в сочетании с СВ–ВСВ прямым веерным кливажом [8]) вдоль подошвы вулканогенного чехла и сверху – их менее амплитудными аналогами в подошве амутской свиты, выступила в роли своего рода регионального калинасыщенного «слоя-концентрактора». Он окаймляет в плане площади развития обедненной K_2O амутской свиты в замковых частях и бортах как Западного, так и Восточного прогибов. Собственно, остатки этого «слоя» также фиксируются плюсовыми аномалиями K_2O к востоку от Солнечного сдвига в сводах и/или крыльях Центрального (экзоконтакт кровли Силинского массива) и (отчасти) Элиберданского выступов (через СВ–ВСВ надвиги зоны влияния едва смытой здесь подошвы чехла и/или через СВ–ВСВ взбросо-надвиги прямого веерного кливажа) (рис. 1).

Само собой, названные складчатые структуры в связи с ССВ левыми сдвигами КСЗ и активизированными ею СЗ и субширотными разломами играли существенную роль в процессах ремобилизации и привноса/выноса фонового калия. Отчасти – это продукты регрессивного зеленокаменного метаморфизма, который нивелировал во многом проявления прогрессивного в породах терригенного основания ($Q_{\text{т}}=0.19C$), особенно вблизи поверхности его денудации. То же самое, следует повториться, справедливо и для любых отрицательных (прежде всего в амутских вулканитах с зеленокаменными их изменениями), а также для локальных положительных аномалий калия. Действительно, многие локальные и плюсовые, и минусовые аномалии K_2O явно приурочены к узлам сочленения и/или пересечения разрывов указанных направлений, включая дочерние ССВ левые сдвиги КСЗ (рис. 1).

Исходя из всего сказанного, можно говорить, что притоку фонового калия повсюду (в т. ч. через биотититы в терригенное основание, $Q_{\text{т}}=0.19C$) сквозь меловую складчато-разломную инфраструктуру КРР способствовали, скорее всего, процессы внедрения, дегазации и кристаллизации наиболее поздних чалбинских калиевых гранитов ($Q_{\text{ч}}=0.30C$), включая их продукты в зоне Комсомольского криптоплутона, подстилающего на глубине 4–8 км практически всю площадь КРР с выходом в Чалбинском батолите. Кровля криптоплутона, как известно [4 и др.], в целом конкордантна СВ складчатым сооружениям 1-го порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С. и др.* Краткий справочник по геохимии. – М.: Недра, 1970. – 278 с.
2. *Гоневчук В.Г.* Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 298 с.3.

3. *Кокорин А.М., Коростелев П.Г., Гоневчук В.Г. и др.* Метаморфизм пород и некоторые особенности локализации рудоносных зон Комсомольского района // *Металлогения Востока СССР*. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. – С. 28-77.
4. *Лишневский Э.Н.* Глубинное строение Комсомольского оловорудного района по геофизическим данным // *Геология рудных месторождений*. 1980. № 6. – С. 37-46.
5. *Радкевич Е.А., Асманов В.Я., и др.* Геология, минералогия и геохимия Комсомольского района. М.: Наука, 1971. – 335 с.
6. *Семеняк Б.И., Митрохин А.Н., Сорокин Б.К. и др.* Геохимия Комсомольского рудного района: терригенные и магматические породы. // *Рудные месторождения континентальных окраин*. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 181–201.
7. *Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование – М.: Наука, 1989. – 165 с.
8. *Mitrokhin A.N.* Cretaceous volcanogenic sedimentary basins and folding in the Komsomolsky tin-ore region, Khabarovsk Territory, Russia // *Geoscience Journal*. 1998. V. 2, № 3. – P. 124–133.

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Королёв А.Э., старший лаборант

Королёв Э.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент

(Казанский (Приволжский) федеральный университет)

Бариева Э.Р., кандидат биологических наук, доцент

Замалетдинов Р.И.

(Казанский государственный энергетический университет)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.12

ПРОЯВЛЕНИЕ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УЧАСТКЕ ВБЛИЗИ СЕЛА НИЖНИЕ ВЯЗОВЫЕ

Карстово-суффозионные процессы привлекают повышенное внимание из-за их потенциальной опасности. В данной статье приведено комплексное исследование экзогенных провалов земной поверхности на территории у села Нижние Вязовые Зеленодольского района Татарстана. По результатам полевых исследований выделено карстовое поле, где зафиксированное 31 провальная воронка. Все проявления карстово-суффозионных процессов приурочены к региональному разлому, расположенному параллельно р. Волга.

Ключевые слова: карстово-суффозионные процессы, грунтовая толща, статическое зондирование, разведочное бурение, маршрутные наблюдения.

Korolev A.E.

Korolev E.A.

Barieva E.R.

Zamaletdinov R.I.

THE MANIFESTATION OF KARST-SUFFUSION PROCESSES IN THE AREA NEAR THE VILLAGE OF NIZHNIYE VYAZOVYE

Karst-suffusion processes attract increased attention because of their potential danger. This article presents a comprehensive study of exogenous sinkholes of the Earth's surface in the territory near the village of Nizhniye Vyazovye, Zelenodolsk district of Tatarstan. According to the results of field research, a karst field has been identified, where 31 sinkholes have been recorded. All manifestations of karst-suffusion processes are confined to a regional fault located parallel to the Volga River.

Keywords: karst-suffusion processes, ground layer, static sounding, exploratory drilling, route observations.

Карстово-суффозионные процессы относятся к наиболее опасным с точки зрения инженерной геологии, так их протекание скрыто от визуального наблюдения в толще грунтов [3]. Об активизации карта и/или суффозии на участках строительных работ часто узнают, когда уже произошли деформации земной поверхности с образованием глубоких провалов [2] [4]. Поэтому при инженерно-геологических изысканиях проявлениям этих процессов уделяется по-

вышенное внимание. В последние годы вдоль побережья р. Волга неподалеку от ее слияния с р. Свияга были зафиксированы свежие провалы земной поверхности, обусловленные протеканием карстово-суффозионных процессов. Основная концентрация провалов приурочена к территории, прилегающей к южно-западной окраине села Нижние Вязовые Зеленодольского района Татарстана. Учитывая близость населенного пункта к участкам, где происходят спорадические оседания земной поверхности, было проведено изучение территории вокруг Собакинских провалов. Название участка происходит по наименованию расположенных здесь Собакинских озер, занесенных в список особо охраняемых природных территорий Республики Татарстан. С геоморфологической точки зрения участок расположен на гребне Вязовских гор, вытянутых вдоль правого коренного берега р. Волга. В геологическом строении территории принимают участия отложения казанского и уржумского ярусов, слагающие основание плато северо-восточной части Приволжской возвышенности. С поверхности среднепермские породы повсеместно перекрыты чехлом четвертичных суглинков.

Методы исследования

Для уточнения геологического разреза территории вокруг Собакинских Ям было проведено статическое зондирование и разведочное бурение на глубину залегания пермских отложений. При исследованиях методом статического зондирования применялся электронный зонд ТЕСТ-К4 СРТУ с установкой УСЗ 15/36А, в соответствии с ГОСТ 19942-2012 «ГРУНТЫ». Замеры параметров пород проводились через 10 см и начинались с глубины 0,4 м для исключения почвенного покрова. Глубина зондирования составляла от 19,0 до 24,60 м. Скважина разведочного бурения располагалась недалеко от точек зондирования для лучшей корреляции состава грунтовой толщи. Абсолютная отметка на устье скважины составляла 130 м, бурение осуществлялось до глубины 14,4 м. В период проведения изысканий было выполнено маршрутное обследование проектируемой площадки и прилегающей территории.

Результаты и их обсуждения

Предварительные ознакомление с фондовыми материалами и ранее построенными геологическими картами позволили установить, что провалы охватывают в основном четвертичную толщу отложений грунтового массива. Причем наиболее интенсивно провальные процессы протекают вдоль зоны регионального Алатырско-Казанско-Арского разлома [1]. Предполагается, что вокруг разлома ниже находящиеся загипсованные доломиты верхнеказанского подъяруса обладают повышенной трещиноватостью. За счет нисходящей фильтрации подземных вод по сообщающимся системкам трещин из пород происходит вымывание части минерального вещества с последующим выносом их в долину р. Волга. Собственно, это и приводит к образованию в грунтовом массиве подземных карстово-суффозионных полостей, над которыми со временем происходит обрушение отложений четвертичного возраста.

По результатам буровых работ было установлено, что разрез четвертичной толщи в верхней части сложен неустойчивыми суглинками, супесями и пылеватыми песками, в нижней части – преимущественно глинами. В условиях переменной влажности породы теряют связность между минеральными частичками, легко переходя из одного состояния консистенции в другое, что вызывает их перемещение вниз по разрезу в полости карстующихся доломитов.

В целях определения карстовой опасности территории, в соответствии с требованиями СП 47.13330.2016, были проведены полевые маршруты, направленные на выявления поверхностных форм проявления карстово-суффозионных процессов. В общей сложности было выявлено 31 провальная воронка. У трех наиболее крупных имеются собственные названия: «Провальное», «Собакино», «Гитара». Воронки преимущественно сильно задернованы, покрыты обильной травяной и кустарниковой растительностью. Водой заполнены 8 воронок.

Совокупность провалов на рассматриваемой территории образует своеобразное карстовое поле, вытянутое вдоль правого берега р. Волга (рис. 1). Наиболее крупные провалы расположены

по цепочке вдоль регионального разлома на отдалении друг от друга 36-42 м. Размеры воронок колеблются от 6 до 84 метров в поперечнике. На участке присутствуют преимущественно «свежие» карстовые воронки в количестве 12 штук. На некотором удалении фиксируется обширная область карстового оврага, простирающегося с востока на запад.

Площадь, занимаемая карстовыми формами, составляет 639739,23 м². Плотность карстовых воронок 12,5 шт/км² с площадным показателем закарстованности 26%. Среднее число образования новых провалов 4,8 штук/год*км².

Изучаемый участок относится по категории устойчивости относительно средних диаметров карстовых провалов к категории «Б», так как средний диаметр воронок 18 метров.

По категории устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов относится к I категории, так как интенсивность провалообразования > 1.0 штук/год*км², а именно 4,8 штук/год*км².

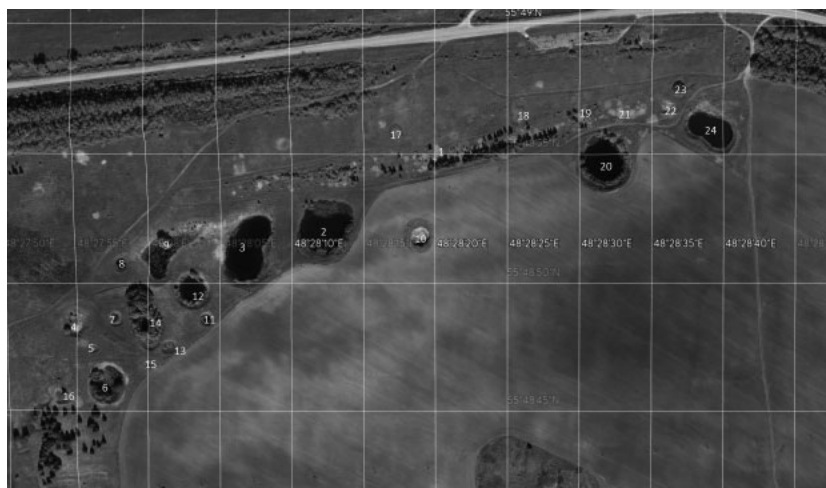


Рис. 1. Расположение провалов в пределах карстового поля

Заключение

По результатам маршрутного обследования была установлена категория I-Б — неустойчивая по карстово-суффозионным процессам [3]. Данное исследование способствует пониманию карстово-суффозионных процессов в условиях полигона «Собакинские ямы». Результаты исследований и могут служить ценным справочником для геологов и инженеров-экологов, занимающихся контролем территорий в карстовых регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая библиотека GeoKniga [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geokniga.org> / (дата обращения 23.07.2024).
2. Лукин В. С. Провальные явления на Урале и в Предуралье / В. С. Лукин // Труды Института геологии. – 1964. – Вып. 69. – С. 34-37.
3. Носков И. В. Комплексные инженерно-геологические исследования карстовых явлений / И.В. Носков, С.А. Ананьев // Вестник евразийской науки [Электронный ресурс] – 2022. – Т. 14. – № 2. – Режим доступа: <https://esj.today/PDF/22NZVN222.pdf> (дата обращения 23.07.2024).
4. Смирнов А.И. Современные карстовые провалы на территории Южного Урала и Предуралья (в границах Республики Башкортостан) / А.И. Смирнов // Инженерная геология. – 2020. – Т.15. – № 4. – С. 42–53.

Геоэкология

Кузнецова О.Г.

(Школа № 1212, г. Москва)

УДК 631.416.8

К ВОПРОСАМ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ЗЕЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Проведены геоботанические исследования особо охраняемых зеленых территорий. Определены доминирующие виды растительности, почв. Определено содержание тяжелых металлов в почвах: меди, кадмия, олова и свинца. Зафиксировано превышение ПДК по свинцу на территории, находящейся в непосредственной близости с автомагистралями.

Ключевые слова: особо охраняемые зеленые территории, почвы, тяжелые металлы в почвах.

Kuznetsova O.G.

ON THE ISSUES OF SPECIALLY PROTECTED GREEN AREAS

Geobotanical studies of specially protected green areas have been carried out. The dominant types of vegetation and soils have been identified. The content of heavy metals in soils has been determined: copper, cadmium, tin and lead. An excess of the MPC for lead was recorded in the area next to the highways.

Keywords: specially protected green areas, soils, heavy metals in soils.

Введение

В 2012 году постановлением Правительства города Москвы земли лесного фонда территории Новой Москвы вошли в состав особо охраняемых природных территорий в качестве особо охраняемых зеленых территорий города [1,2]. Таким образом, возникла необходимость в проведении экологических исследований данных территорий, а также мониторинга [3].

Материалы и методы

Произведено исследование трех участков на территории Новой Москвы. Данные территории являются слабонарушенными под влиянием техногенеза. На рисунке 1 красными точками указаны основные места взятия проб.

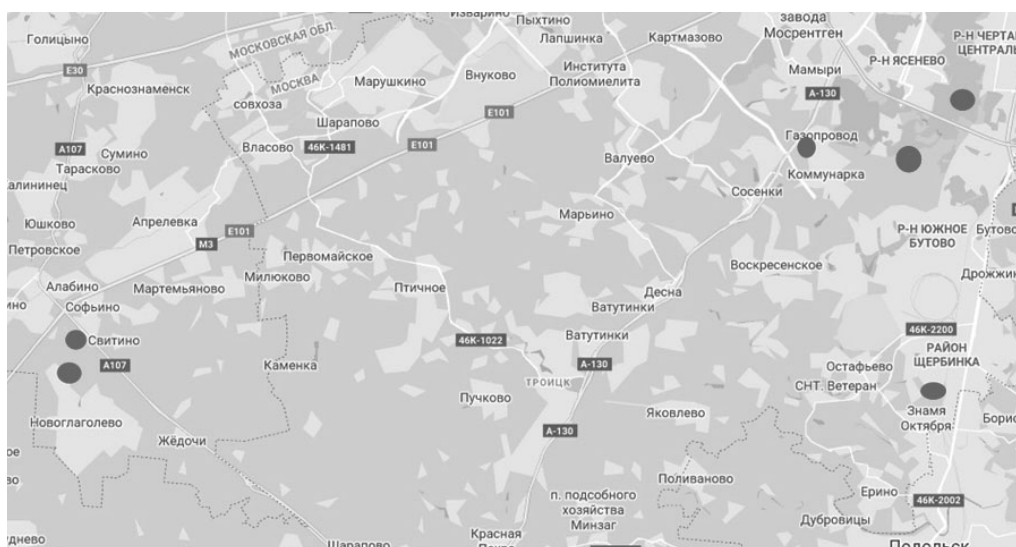


Рис. 1. Карта-схема участков исследований
(красными точками отмечены основные почвенные разрезы).

Первый исследованный участок, кадастровый номер 77:21:0000000:40, площадью 71,62 га, расположенный по адресу г. Москва, пос. Новофедоровское, к северо-востоку от д. Рассудово, вдоль ВЛЭП, по административно-территориальному делению относится к Троицкому административному округу. Второй участок, кадастровый номер 77:17:0000000:3484, площадью 152,99 га, расположен по адресу г. Москва, поселение Сосенское, между СНТ «Надежда Ветеранов», СНТ «Рассвет», СНТ «Десна», Калужским ш. и участком сельскохозяйственного назначения южнее д. Сосенки, относится к Новомосковскому АО. Третий участок, кадастровый номер 77:20:0000000:94, общей площадью 68,35 га, расположенный по адресу город Москва, поселение Рязановское, между ОНСТ «Девятское», СНТ «Луч», СНТ «Кабельщик», СНТ «Стройиндустрия №48», СНТ «Сад № 3 ПЭМЗ», СНТ «Цементник», СНТ № 7 ПМЗ, СНТ «Аэрофлот-1», СНТ «Надежда», по административно-территориальному делению относится к Новомосковскому АО.

Отбор проб почвы проводился в соответствии с требованиями к отбору проб почв при общих и локальных загрязнениях, изложенными в ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017, а также «Методических указаниях по агрохимическому обследованию почв сельскохозяйственных угодий» и «Методических указаниях по проведению полевых и лабораторных исследований при контроле загрязнения окружающей среды металлами». Определение тяжелых металлов в почве проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией. Определялись подвижные формы тяжелых металлов. Определение проводилось в кислотной почвенной вытяжке: 1М HNO_3 согласно «Методике выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом».

Результаты исследований

На территории обследованных участков преобладает равнинный рельеф, кочки и западины в микрорельефе. На всех участках присутствует локальная почвенная эрозия, ветровал. Доминирующая растительность: *Picea abies*, *Betula pendula*; в подросте *Corylus avellana*, *Sorbus aucuparia*; в травянистом ярусе *Aegopodium podagraria*, *Asarum europaeum*, *Pteridium aquilinum*, *Impatiens parviflora*, *Convallaria majalis*, *Carex* sp., мхи *Polytrichum commune* и *Sphagnum* sp.[4]

Для почв исследованных участков характерно строение почвенного профиля: АУ-ЕЛ-ВЛ-ВТ-С. Присутствуют признаки ожелезнения, языковатые переходы элювиального горизонта, небольшие признаки оглеения на небольших участках. Лесная подстилка включает мхи (класс Листостебельные, подклассы Зеленые и Сфагновые), опад хвои и листьев, ветви, корневища папоротников. Подстилка ферментативно-гумифицированная, содержит разлагающийся опад (разной степени разложения), остатки коры. Мощность подстилки составляет от 5 до 10 см. Под подстилкой формируется серо гумусовый горизонт (дерновый) буровато-серого цвета, мощностью от 5 до 11 см. Далее диагностирован элювиальный горизонт ЕЛ, мощностью до 25 см. Наиболее светлый в профиле, с сероватым оттенком, легкосуглинистого механического состава. Субэлювиальный горизонт ВЛ характерный бурый, со светло-серыми языковатыми подтеками, выделялись железомарганцевые конкреции. Происходят процессы аккумуляции железа, марганца. Структура иллювиального текстурного горизонта ВТ ореховая, по механическому составу – средний суглинок, уплотненный. На территории исследованных участков преобладают дерново-палево-подзолистые неглубоко осветленные суглинистые почвы.

Определены подвижные формы тяжелых металлов: медь, кадмий, свинец и олово в почвенных вытяжках. Медь, кадмий, олово находились в следовых количествах, менее 0,1 мг/кг. Для свинца определены значения и представлены в таблице 1.

Концентрация свинца в почвенных пробах

Номер участка	Содержание свинца
Участок 1	21,9 мг/кг $\pm$ 1,67 мг/кг
	6,36 $\pm$ 1,79 мг/кг
Участок 2	Не обнаружено
Участок 3	9,93 мг/кг $\pm$ 1,75 мг/кг

Для свинца определена ПДК от 1.04.2006 года равная 6 мг/кг. Таким образом, почвы первого участка содержали свинца в 3,65 раз превышающих ПДК, третьего участка – в 1,65 раз превышающих ПДК. При сохранении тенденции загрязнения концентрации тяжелых металлов будут возрастать [5]. Свинец и другие тяжелые металлы негативно влияют на микробный комплекс почв, снижая буферные свойства почвы [6,7].

Заключение и обсуждение

Таким образом, в ходе почвенно-геоботанических исследований на трёх участках, определены основные доминирующие виды растительности, основные виды почв, детально описано 6 почвенных разрезов, определены концентрации свинца в почвах.

Концентрации свинца в почвах оказались значительными и превышали ПДК более, чем в 3 раза. Это говорит о процессах аккумуляции свинца в почвах. Причина в близком расположении ООЗТ и автомагистралей Киевского и Калужского шоссе. Свинец попадает в почву благодаря выхлопным газам автотранспорта.

В целях сохранения экологического каркаса территории расширяющегося мегаполиса рекомендовано: установление шумозащитных экранов вдоль Киевского и Калужского шоссе, МКАД.; высадка лесополос вдоль дорог и шоссе; ограничение рекреации на территории ООЗТ; сбор и своевременный выброс мусора с территорий ООЗТ. В целях снижения концентрации свинца и других тяжелых металлов в почвах необходимо проводить комплексные мероприятия: химическая мелиорация, внесение органических и минеральных удобрений, высадка бобовых и злаковых культур [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранова О.Ю. Градостроительная практика развития особо охраняемых зеленых территорий «Новой Москвы» / Баранова О.Ю., Воронина Н.Б. // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН – 2022 – 3(54), С. 9–14.
2. Воронина Н.Б. Особо охраняемые зеленые территории «новой» Москвы. Десять лет: некоторые итоги / Воронина Н.Б., Баранова О.Ю. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами», посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН – 2022, С.304-307.
3. Гусева А.С. Оценка загрязненности почв тяжелыми металлами некоторых районов территории новой Москвы / Гусева А.С., Петров В.А. // Доклады Российской академии наук о земле – 2023. – №1, С.117–122.
4. Демина С.А. Комплексный анализ почв и зеленых насаждений в парках Новой Москвы, образованных на месте бывших сельскохозяйственных территорий и леса / С. А. Демина, В. И. Васенев, К. И. Махиня [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17, № 3. – С. 331–349.
5. Кузнецова О.Г. Особенности аккумуляции тяжелых металлов почвами западного склона Сура-свияжского междуречья Приволжской возвышенности / Кузнецова О.Г., Рукави-

цын В.В., Евграфова И.М., Хоменко В.П. // Успехи современного естествознания – 2023 – 12, С.101 –107.

6. *Казакова Н.А.* Влияние тяжелых металлов на экологические свойства микроорганизмов в почве / Казакова Н.А., Фролов Д.А., Борисова С.П., Куклева Т.В. // Естественные и технические науки – 2023 – 12, С.125–129.
7. *Омургазиев Ч.М.* Оценка влияния автомобильных выбросов на микрофлору почв г. Бишкека / Омургазиев Ч.М., Ибраева С.Ж., Нурканбек К.А., Быкытбек К.А. // Исследование живой природы Кыргызстана – 2023 - 1, С.12–19.
8. *Бабичев А.Н.* Оценка возможности возделывания сельскохозяйственных культур при загрязнении почв тяжелыми металлами / Бабичев А.Н., Юркова Р.Е, Докучаева Л.М. // Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации – 2022 – 4, С.12–26.

Семенов М.Ю., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Маринайте И.И., кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Голобокова Л.П., кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Ходжер Т.В., доктор географических наук, главный научный сотрудник
(Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.08

УДК 556.114

СОСТАВ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА, ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОЧВ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Цель исследования заключалась в выявлении различий между составами полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) атмосферы, воды, почвы и донных отложений водоемов и водотоков бассейна озера Байкал. Концентрации 10 приоритетных ПАУ в пробах были измерены с использованием газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Концентрация ПАУ во всех объектах среды значительно варьировали. Установлено, что суммарные концентрации ПАУ увеличивались с увеличением плотности вещества объекта среды в ряду атмосфера – поверхностные воды – донные осадки – почвы. Также установлено, что нелетучие гидрофобные ПАУ, состоящие из 5-6 бензольных колец, накапливаются в почвах и донных отложениях, тогда как растворимые в воде летучие ПАУ, состоящие из 3–4 бензольных колец, накапливаются в поверхностных водах.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, компоненты природной среды, воздух, почвы, поверхностные воды, донные отложения, источники, бассейн озера Байкал.

Semenov M. Yu.
Marinaite I. I.
Golobokova L. P.
Khodzher T. V.

COMPOSITION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS OF THE ATMOSPHERE, SURFACE WATERS, BOTTOM SEDIMENTS AND SOILS OF THE LAKE BAIKAL NATURAL TERRITORY

The objective of the study was to identify differences between the compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of the atmosphere, water, soil and sediments of the Lake Baikal natural territory. Concentrations of 10 priority PAHs in samples were measured using gas chromatography with mass spectrometric detection. The concentration of PAHs in all components of the environment varied significantly from place to place. The highest PAH concentrations were found in soil, whereas the lowest concentrations were found in air. Non-volatile hydrophobic PAHs consisting of 5-6 benzene rings have been found to accumulate in soils and sediments, while volatile PAHs soluble in water, consisting of 3-4 benzene rings, have been found to accumulate in water.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, air, soils, surface waters, bottom sediments, Lake Baikal basin.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) - класс органических веществ, состоящих из двух и более конденсированных бензольных колец [1]. Интерес к ПАУ объясняется их мутагенными и канцерогенными свойствами в отношении живых организмов [2]. ПАУ образуются в природных процессах, однако большинство их источников являются антропогенными. В их числе сжигание угля, нефтепродуктов, разливы нефти и т.д. [3]. Благодаря этому ПАУ обнаруживаются во всех компонентах природной среды, таких, как воздух, вода, почва, донные отложения и биота [4].

В бассейне озера Байкал закономерности миграции ПАУ никогда не выявлялись путем анализа данных о распределении ПАУ между несколькими компонентами среды. До настоящего времени, исследования в этой области ограничивались сопоставлением состава ПАУ между двумя взаимосвязанными компонентами, такими, как поверхностные воды и атмосферный воздух [5], поверхностные воды и донные отложения [6, 7, 8], поверхностные воды и почвы [9, 10], поверхностные воды и биота [11, 12], поверхностные воды и подводные нефтепроявления [13, 14].

Цель настоящего исследования заключалась в выявлении различий между составами полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) атмосферы, воды, почвы и донных отложений водоемов и водотоков бассейна озера Байкал.

Материалы и методы

Исследование проводилось в бассейне озера Байкал в 2019-2021 гг. В качестве объектов исследования использовался атмосферный аэрозоль, поверхностные воды, донные осадки и почвы. Пробы вод и донных отложений отбирались из десяти притоков озера Байкал. Пробы аэрозоля отбирались из воздуха фоновых районов на побережье озера Байкал, а также из воздуха городов, расположенных на юго-восточном побережье озера, а также из воздуха административных и промышленных центров, таких как города Иркутск и Шелехов. Пробы почвы отбирались как в пределах перечисленных выше поселений, так и за ними.

Атмосферный аэрозоль отбирался на стекловолоконные фильтры [15]. Пробы озерной воды отбирались как в литоральной зоне озера вблизи поселений, так и в пелагиальной зоне, вдали от побережья. Речная вода отбиралась в населенных пунктах и вблизи устьев рек. Речные и озерные воды отбирались с поверхности. Точки отбора проб донных отложений рек и точки отбора проб почвы находились вблизи точек отбора проб речных вод. Пробы донных отложений отбирались с поверхности с помощью драги, пробы почвы отбирались лопатой.

Во всех объектах среды анализировалось общее содержание растворенных и нерастворимых ПАУ. ПАУ из проб экстрагировались гексаном. Концентрации ПАУ измерялись с помощью газового хроматографа Agilent 7890В. Были проанализированы десять ПАУ, включая фенантрен (PEN), антрацен (ATN), флуорантен (FAN), пирен (PRN), бензо[а]антрацен (BZN), хризен (CRN), бензо[б], фторантен (BBN), бензо(а)пирен (BAN), индено[1,2,3-сd]пирен (IDP), бензо(ghi)перилен (BHP). Далее в тексте ПАУ, существующие как в газовой, так и в твердой фазе (PEN, ATN, FAN, PRN), называются летучими ПАУ, в то время как ПАУ, которые существуют только в твердой фазе (BZN, CRN, BBN, BKN, BAN, BEN, IDP и BHP), называются нелетучими ПАУ.

Результаты и обсуждение

Суммарные концентрации двенадцати ПАУ в воздухе варьировали от десятых долей до десятков пикограммов на кубический метр (Табл. 1). В промышленных районах и районах индивидуальной жилой застройки концентрация ПАУ в воздухе была значительно выше среднегородской. Суммарная концентрация ПАУ в воздухе на побережье Байкала снижалась с увеличением расстояния от населенных пунктов. В большинстве отобранных проб низкомо-

лекулярные летучие ПАУ преобладали над высокомолекулярными нелетучими ПАУ. Вероятно, это было связано с преобладанием летучих ПАУ в выбросах большинства антропогенных источников, таких как угольные ТЭЦ, автотранспорт и дровяные печи [8]. Преобладание высокомолекулярных нелетучих ПАУ отмечалось в воздухе небольших населенных пунктов.

В поверхностных водах летучие ПАУ абсолютно превалировали над нелетучими (Табл. 1), как и в атмосферном аэрозоле. Самая высокая концентрация (несколько десятков нг/л) была характерна для РЕН. Очевидно, это связано с увеличением растворимости ПАУ с уменьшением числа бензольных колец. Средняя концентрация суммы ПАУ в водах рек варьировала от одного до десяти нг/л. При этом, в загрязненных районах общая концентрация ПАУ достигала сотен нг/л. В воде Байкала концентрация ПАУ была несколько ниже, чем в водах самых чистых его притоков. Более низкие концентрации ПАУ в Байкале, возможно, обусловлены более длительным временем водообмена.

В донных отложениях рек суммарная концентрация ПАУ варьировала от десятков до сотен нг/г (Табл. 1). В большинстве образцов донных отложений нелетучие ПАУ, такие как ВВН, ИДР и ВНР, доминировали над летучими ПАУ. Очевидно, это связано с уменьшением растворимости ПАУ с увеличением числа бензольных колец. Тем не менее, были выявлены и образцы отложений, характеризующиеся преобладанием летучих ПАУ. Возможно, это было вызвано антропогенным загрязнением. Концентрации ПАУ в донных отложениях рек на городских и сельских территориях были значительно выше, чем в донных осадках фоновых территорий. Также необходимо отметить, что, концентрации ПАУ в донных отложениях в значительной степени зависели от их механического состава: в тонкодисперсных отложениях они были значительно выше, чем в грубодисперсных [8].

Суммарная концентрация ПАУ в почвах колебалась от нескольких нг/г на фоновых территориях до нескольких сотен нг/г на участках, расположенных близ источников антропогенного загрязнения (Табл. 1). Самые низкие концентрации были отмечены для летучих ПАУ, таких как РЕН и АТН. Самые высокие концентрации оказались типичны для летучего FAN и нелетучего BAN. Во всех пробах доля нелетучих ПАУ была выше, чем доля летучих.

Заключение

На концентрацию ПАУ влияет плотность объекта среды. Именно поэтому она увеличивается в ряду: воздух < вода < почвы ≤ донные осадки. Распределение ПАУ между атмосферой, водами, донными осадками и почвами обусловлено различиями в свойствах летучих и нелетучих ПАУ. Как правило, доля растворимых летучих ПАУ уменьшается в ряду атмосфера - поверхностные воды - донные отложения - почва. В связи с плохой растворимостью нелетучих ПАУ в воде, их доля увеличивается в том же ряду.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0279-2021-0014 (121032300199-9) «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ravindra K., Sokhi R., Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. // Atmospheric Environment. 2008, Vol. 42, № 13. – P. 2895–2921.
2. Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic

- aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia. // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022, Vol. 44. – P. 409–432.
3. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. // *Environmental Pollution*. 2012, Vol. 162. – P. 110–119.
 4. *Jesus F., Pereira J.L., Campos I., Santos M., Ré A., Keizer J., Nogueira A., Gonçalves F.J.M., Abrantes N., Serpa D.* A review on polycyclic aromatic hydrocarbons distribution in freshwater ecosystems and their toxicity to benthic fauna. *Science of the Total Environment*. 2022, Vol. 820. – P. 153282.
 5. *Semenov M.Y., Marinaite I.I., Golobokova L.P., Khuriganova O.I., Khodzher T.V., Semenov Y.M.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lake Baikal water and adjacent air layer. // *Chemistry and Ecology*. 2017, Vol. 33. – P. 977–990.
 6. *Nikanorov A.M., Reznikov S.A., Matveev A.A., Arakelyan V.S.* Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lake Baikal basin in the areas of intensive anthropogenic impact. // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012, Vol. 37. – P. 477–484.
 7. *Шурапова Г.С., Утюжникова Н.С., Рабина О.А., Вялков А.И., Морозов С.В., Батоев В.Б.* Загрязнение полиароматическими углеводородами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013, Т. 21, № 2. – С. 189–195.
 8. *Semenov M.Y., Marinaite I.I., Silaev A.V., Begunova L.A.* Composition, Concentration and Origin of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Waters and Bottom Sediments of Lake Baikal and Its Tributaries. // *Water*. 2023, Vol. 15. – P. 2324.
 9. *Semenov M.Y., Marinaite I.I.* Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments. // *Environmental Earth Sciences*. 2016, Vol. 75. – P. 207.
 10. *Semenov M.Y., Silaev A.V., Semenov Y.M., Begunova L.A., Semenov Y.M.* Identifying and Characterizing Critical Source Areas of Organic and Inorganic Pollutants in Urban Agglomeration in Lake Baikal Watershed. // *Sustainability*. 2022a, Vol. 14. – P. 14827.
 11. *Reznikov S.A., Yakunina O.V., Matveev A.A., Luk'yanova N.N., Bogush I.V., Adzhiev R.A.* Accumulation Dynamics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Baikal Bottom Biocenoses Assessed from Biogeochemical Monitoring Data. // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018, Vol. 43. – P. 332–339.
 12. *Морозов С.В., Шурапова Г.С., Ермолаева О.А., Черняк Е.И., Ткачева Н.И., Батоев В.Б., Могнонов Д.М.* Изучение поведения стойких органических загрязнителей в Байкал-Селенгинской экосистеме как элемент выполнения Стокгольмской конвенции о СОЗ. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022, Т. 30, № 6. – С. 620–631.
 13. *Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Moskvina V.I., Burshtein L.M., Zemskaya T.I., Kostyreva E.A., Kalmychikov G.V., Khlystov O.M.* Petroleum potential of Baikal deposits. // *Russian Geology and Geophysics*. 2007, Vol. 48. – P. 1046–1053.
 14. *Gorshkov A., Pavlova O., Khlystov O., Zemskaya T.* Fractioning of petroleum hydrocarbons from seeped oil as a factor of purity preservation of water in Lake Baikal (Russia). // *Journal of Great Lakes Research*. 2020, Vol. 46, № 1. – P. 115–122.
 15. *Golobokova L., Khodzher T., Khuriganova O., Marinaite I., Onishchuk N., Rusanova P., Potemkin V.* Variability of chemical properties of the atmospheric aerosol above Lake Baikal during large wildfires in Siberia. // *Atmosphere*. 2020, Vol. 11. – P. 1230.

Таблица 1

Состав ПАУ атмосферного аэрозоля, поверхностных вод,
донных отложений и почв бассейна озера Байкал

PEN	ATN	FAN	PRN	BZN	CRN	BBN	BAN	IDP	ВНР
Концентрации ПАУ в аэрозоле, пг/м ³									
478	4,89	176	249	66	141	251	35,7	43,1	55,6
Концентрации ПАУ в поверхностных водах, нг/л									
3,06	1,01	0,75	0,61	0,34	0,18	1,12	0,14	0,51	0,86
Концентрации ПАУ в донных осадках, нг/г									
20,7	0,99	4,14	5,02	1,33	2,12	24,4	3,99	5,06	6,63
Концентрации ПАУ в органогенном слое почвы, нг/г									
28,4	4,16	80,9	51,4	37,2	38,6	56,1	35,5	20,2	18,6

Семенов М.Ю., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Маринайте И.И., кандидат химических наук, старший научный сотрудник
(Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук)
Семенов Ю.М., доктор географических наук, главный научный сотрудник
(Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.09

УДК 556.114

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Цель исследования заключалась в выявлении происхождения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в поверхностных водах и донных отложениях. Концентрации четырех приоритетных ПАУ в пробах были измерены с использованием газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Выявление источников ПАУ производилось на основе величин отношений концентраций маркерных ПАУ. Установлено, что высокие концентрации ПАУ обусловлены высокой плотностью населения, в то время как низкие концентрации ПАУ – малой плотностью. Также установлено, что точность идентификации источников ПАУ в значительной степени зависит от уровня загрязнения и выбранного маркерного отношения концентраций ПАУ. Кроме того, установлено, что из-за разной устойчивости отдельных ПАУ к разложению результаты выявления источников выбросов являются весьма условными.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, поверхностные воды, донные отложения, источники, притоки Байкала

Semenov M. Yu.
Marinaite I. I.
Semenov Yu. M.

SOURCES OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN SURFACE WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY

The aim of the study was to identify the genesis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface waters and bottom sediments. The concentrations of four priority PAHs in samples were measured using gas chromatography with mass spectrometry. The identification of PAH sources was based on the magnitude of the concentration ratios of the marker PAHs. It was found that high PAH concentrations are due to the high population density, while low PAH concentrations are due to the low density. It has also been found that the accuracy of identification of PAH sources depends to a large extent on the level of contamination and the selected marker ratio of the PAH concentrations. In addition, it was found that due to the different resistance of individual PAHs to degradation, the results of identifying emission sources are very conditional.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, surface waters, bottom sediments, sources, Lake Baikal tributaries.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) - класс органических веществ, состоящих из двух и более бензольных колец [1]. Исследования, связанные с ПАУ, как правило, посвящены установлению их происхождения в поверхностных водах [2, 3], подземных водах [4, 5], почвах [6, 7]. Для предотвращения загрязнения необходимо определить источники ПАУ и принять меры по сокращению выбросов ПАУ из этих источников. Для идентификации источников ПАУ обычно используются отношения концентраций отдельных ПАУ [8, 9, 10]. В бассейне озера Байкал проводились единичные исследования, посвященные выявлению источников ПАУ в отдельных объектах среды [11, 12], однако полученные результаты критически не оценивались.

Целью настоящего исследования было установить источники ПАУ вод и донных отложений Байкальской природной территории и оценить достоверность полученных результатов.

Материалы и методы

Исследование проводилось в пределах Байкальской природной территории (БПТ) в 2022–2024 гг. В состав БПТ входят озеро Байкал, водоохранная зона, прилегающая к озеру Байкал, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, особо охраняемые природные территории, прилегающие к озеру Байкал, а также прилегающая к озеру Байкал территория шириной до 200 километров на запад и северо-запад от него [13]. В качестве объектов исследования использовались воды и донные осадки притоков Байкала. Пробы объектов исследования отбирались и анализировались согласно существующим методикам [11, 12].

Пробы вод и донных отложений отбирались как в населенных пунктах, так и за их пределами. Пробы вод отбирались с поверхности, пробы донных отложений отбирались с помощью драги.

ПАУ экстрагировались *n*-гексаном, после чего экстракты концентрировали с помощью роторного испарителя. Концентрации ПАУ измерялись с помощью газовой хроматографии. Были проанализированы четыре ПАУ, включая флуорантен (FAN), пирен (PRN), бензо[а]антрацен (BZN) и хризен (CRN). Далее в тексте, FAN и PRN, присутствующие в окружающей среде как в газовой, так и в твердой фазе, называются летучими ПАУ, в то время как BZN и CRN, которые присутствуют в окружающей среде только в твердой фазе, называются нелетучими ПАУ.

Результаты и обсуждение

Величины отношений FAN/(FAN+PRN), полученных для поверхностных вод, свидетельствовали об образовании обнаруженных ПАУ в результате горения древесины (Табл. 1, Табл. 2). Единое происхождение ПАУ в поверхностных водах городских и фоновых районов свидетельствует о значительном вкладе атмосферных осадков в формирование водного стока исследуемой территории. Значения FAN/(FAN+PRN), рассчитанные для донных отложений говорят о том, что ПАУ в них также образовались в результате сжигания древесины. Единое происхождение ПАУ в обоих компонентах окружающей среды говорит либо о правильности полученных данных, либо о недостаточной пригодности отношения концентраций FAN и PRN в качестве трассера источников ПАУ.

Значения отношения концентраций нелетучих BZN и CRN (BZN/(BZN+CRN)), рассчитанные для поверхностных вод и донных осадков варьировали в значительно более узком диапазоне (Табл. 1, Табл. 2). Согласно им, ПАУ в водах фоновых территорий образовались в процессе горения бензина и дизельного топлива в двигателях автомобильного транспорта. При этом, ПАУ в донных отложениях тех же территорий появились в результате горения угля. На урбанизированных территориях обнаруженные в воде ПАУ образовались в процессе горения угля, а в донные отложения поступили с выбросами автомобильного транспорта. Значительные раз-

личия в происхождении ПАУ между фоновыми и урбанизированными территориями, очевидно, свидетельствуют о разном характере землепользования на этих территориях. Тем не менее, такие различия могут быть обусловлены и различиями в скоростях разложения BZN и CRN в различных природных условиях.

Заключение

Разные скорости разложения ПАУ в поверхностных водах и донных осадках приводят к различиям при выявлении источников. Очевидно, что источники загрязнения едины для всех природных объектов. Поэтому, для выявления источников загрязнения в разных объектах среды должны использоваться разные ПАУ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00101, <https://rscf.ru/project/23-27-00101/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Ravindra K., Sokhi R., Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. // *Atmospheric Environment*. 2008, Vol. 42. – 2895–2921.
2. Yu H., Liu Y., Han C., Fang H., Weng J., Shu X., Pan Y., Ma L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters from the seven main river basins of China: Spatial distribution, source apportionment, and potential risk assessment. // *Science of the Total Environment*. 2021, Vol. 752. – P. 141764.
3. Grmasha R.A., Abdulameer M.H., Stenger-Kovács C., Al-sareji O.J., Al-Gazali Z., Al-Juboori R.A., Meiczinger M., Hashim K.S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface water and sediment along Euphrates River system: Occurrence, sources, ecological and health risk assessment. // *Marine Pollution Bulletin*. 2023, Vol. 187. – P. 114568.
4. Liang M., Liang H., Rao Z., Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: Spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment. // *Chemosphere*. 2020, Vol. 259. – P. 127534.
5. Montuori P., De Rosa E., Cerino P., Pizzolante A., Nicodemo F., Gallo A., Rofrano G., De Vita S., Limone A., Triassi M. Estimation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Groundwater from Campania Plain: Spatial Distribution, Source Attribution and Health Cancer Risk Evaluation. // *Toxics*. 2023, Vol. 11. – P. 435.
6. Wang D., Ma J., Li H., Zhang X. Concentration and Potential Ecological Risk of PAHs in Different Layers of Soil in the Petroleum-Contaminated Areas of the Loess Plateau, China. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, Vol. 15, № 8. – P. 1785.
7. Kariyawasam T., Doran G.S., Howitt J.A., Prenzler P.D. Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in soils and sediments: Sustainable approaches for extraction and remediation. // *Chemosphere*. 2022, Vol. 291, № 3. – P. 132981.
8. Tobiszewski M., Namiesnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. // *Environmental Pollution*. 2012, Vol. 162. – P. 110–119.
9. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. // *Organic Geochemistry*. 2002, Vol. 33. – P. 489–515.
10. Galarneau E. Source specificity and atmospheric processing of airborne PAHs: implications for source apportionment. // *Atmospheric Environment*. 2008, Vol. 42. – P. 8139–8149.

11. *Semenov M.Y., Marinaite I.I.* Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments. // *Environmental Earth Sciences*. 2016, Vol. 75. – P. 207.
12. *Semenov M.Y., Silaev A.V., Semenov Y.M., Begunova L.A., Semenov Y.M.* Identifying and Characterizing Critical Source Areas of Organic and Inorganic Pollutants in Urban Agglomeration in Lake Baikal Watershed. // *Sustainability*. 2022a, Vol. 14. – P. 14827.
13. Федеральный закон от 1 мая 1999 г. № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал» // СЗ РФ. 1999. № 18. Ст. 2220.

Таблица 1

Величины диагностических отношений ПАУ, вычисленных для объектов окружающей среды

	FAN/(FAN+PRN)	BZN/(BZN+CRN)
Поверхностные воды	$0,62 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,09$
Донные осадки	$0,60 \pm 0,03$	$0,36 \pm 0,04$

* величина стандартного отклонения

Таблица 2

Стандартные величины диагностических отношений ПАУ источников выбросов

	FAN/(FAN+PRN)	BZN/(BZN+CRN)
Горение нефтепродуктов	$<0,4$	—
Горение ископаемого топлива	$0,4-0,5$	—
Горение древесины	$>0,5$	—
Нефть и нефтепродукты	—	$<0,2$
Горение угля	—	$0,2-0,35$
Выхлопы автотранспорта	—	$>0,35$

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Строительство и архитектура

Безопасность объектов строительства

Никитин И.С., кандидат химических наук, доцент

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)

Марков А.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры

(Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий)

DOI: 10.25633/ETN.2024.08.10

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО ПОКРЫТИЯ ПЕЧИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

В статье рассматривается установление углеводородного температурного режима согласно ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Проведена сравнительная оценка потерь тепла при внутреннем покрытии печи шамотом и в случае замены одной из стен печи стальным огнезащитным экраном. Потери тепла не излучением (конвективные, химическим недожогом) во внимание не принимаются.

Ключевые слова: углеводородный температурный режим, испытание огнезащитных экранов, потери тепла в печи.

Nikitin I.S.

Markov A.G.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE INTERNAL COATING OF THE FURNACE FOR TESTING BUILDING STRUCTURES ON THE ESTABLISHMENT OF THE TEMPERATURE CONDITIONS

The article discusses the establishment of a hydrocarbon temperature conditions in accordance with GOST R EN 1363-2-2014. A comparative assessment of heat losses during the internal coating of the furnace with chamotte and in the case of replacing one of the furnace walls with a steel flame retardant screen was carried out. Non-radiation heat losses (convective, chemical underburning) are not taken into account.

Keywords: hydrocarbon temperature conditions, testing of flame retardant screens, heat loss in the furnace.

Согласно ГОСТ 30247.0-94 для испытания строительных конструкций и элементов инженерных систем на огнестойкость при стандартных условиях теплового воздействия применяются

испытательные печи с системой подачи и сжигания топлива (далее - печи). Основные размеры проемов печей должны быть такими, чтобы обеспечить возможность проведения испытаний образцов конструкций проектных размеров, а глубина огневой камеры печей должна быть не менее 0,8 м.

ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 «Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы» [1] устанавливает условия углеводородного температурного режима. Рост температуры должен следующим образом зависеть от времени:

$$T = 1080[1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}] + 20$$

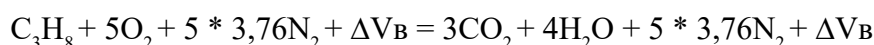
где t – время, прошедшее с момента начала испытания, мин;

T – требуемая средняя температура в испытательной печи, °C

Рассмотрим печь размером $3 \cdot 3 \cdot 0,8$ м и объемом $7,2 \text{ м}^3$, в которой температурный режим обеспечивается сжиганием химически чистого пропана (C_3H_8). На 15ой минуте углеводородного режима температура среды в печи должна составлять $1071 \text{ }^\circ\text{C}$.

Если пренебречь рядом факторов (в том числе конвективным излучением, неравномерностью процесса окисления и потерями тепла вследствие химического недожога), то можно примерно оценить объем газа, необходимый для сжигания в печи чтобы обеспечить требуемую температуру. 1 м^3 пропана дает при сжигании $91,27 \text{ МДж}$ тепла.

Обозначив избыток воздуха за переменную и используя метод последовательных приближений (интерполируя теплосодержание продуктов горения при искомой температуре), получим:



$$T_c = T_1 + \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{C}_3\text{H}_8} - Q^{T_1}) \cdot (T_2 - T_1)}{Q^{T_2} - Q^{T_1}}$$

$$1071 = 1000 + \frac{(91270 - (3 \cdot 2210 + 4 \cdot 1720 + 18,8 \cdot 1400 + \Delta V_{\text{в}} \cdot 1410)) \cdot (1100 - 1000)}{3 \cdot 2460 + 4 \cdot 1930 + 18,8 \cdot 1550 + \Delta V_{\text{в}} \cdot 1560 - 3 \cdot 2210 + 4 \cdot 1720 + 18,8 \cdot 1400 + \Delta V_{\text{в}} \cdot 1410}$$

где Q^{T_1} и Q^{T_2} – теплосодержание продуктов горения при температуре T_1 и T_2 соответственно. Отсюда $\Delta V_{\text{в}} = 31,8$ моль/моль, $\varphi_{\text{r}} = 1,74\%$.

Таким образом, для получения температуры газовой среды $1071 \text{ }^\circ\text{C}$ в камере объемом $7,2 \text{ м}^3$ необходимо сгорание $0,125 \text{ м}^3$ пропана при условии полного отсутствия потерь тепла.

По сути, потери тепла излучением как раз и будут составлять тот лучистый поток, который падает на стенки печи и поглощается ими. Для стенки из шамота толщиной 200 мм при температуре внутренней поверхности $1071 \text{ }^\circ\text{C}$ и внешней не более $127 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициентом теплопроводности $1,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [2] тепловой поток составит:

$$q = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{\Delta x} = \frac{(1071 - 127) \cdot 1,1}{0,2} = 5192 \text{ Вт/м}^2$$

Площадь поверхности, принимающей излучение, есть площадь граней прямоугольника внутренней поверхности печи $S = 2ab + 2ac + 2bc$ и составляет $S = 2 \cdot 3 \cdot 3 + 2 \cdot 3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 3 \cdot 0,8 = 27,6 \text{ м}^2$. Суммарно тепловой поток должен составлять $F = 5192 \cdot 27,6 = 143299 \text{ Вт}$ или Дж/с . Для компенсации этих потерь тепла необходимо сжигать $143299 / 91,27 \cdot 10^6 = 0,0016 \text{ м}^3$ пропана в секунду.

Так же данный углеводородный температурный режим может использоваться и при испытании металлических конструкций, например, огнезащитных экранов, выполненных из стали. Такие экраны при нагревании выше $530 \text{ }^\circ\text{C}$ излучают световые лучи различного цвета в зависимости от температуры нагрева (Рис.1)

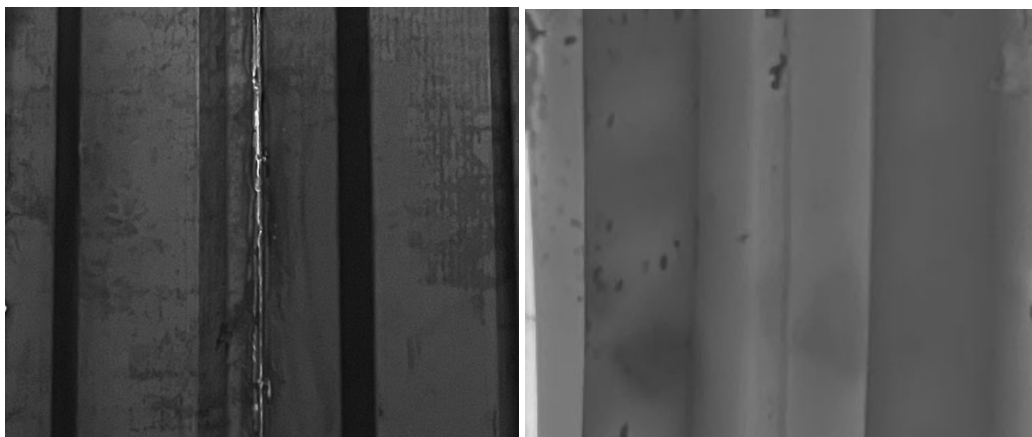


Рис. 1. Свечение огнезащитных экранов при испытании по ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 до нагрева (слева) и через 15 минут после установления углеводородного режима (справа).

По цветовой таблице нагрева металла можно установить, что наружная сторона экрана была нагрета до температуры около 1050 °С

Для испытаний могут использоваться экраны с различными габаритными размерами, в том числе закрывающие одну из стен печи по всей площади, т.е. 3·3 м. По закону Стефана – Больцмана тепловой поток, исходящий через данную сторону составит:

$$R = \sigma \cdot T^4, R = \frac{F}{S},$$

$$F = S \cdot \sigma \cdot T^4 = 9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1050 + 273)^4 = 1563381 \text{ Вт}$$

К этому значению следует прибавить излучение, приходящееся на оставшиеся 5 стен печи, не замененных экраном:

$$S = ab + 2ac + 2bc = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 3 \cdot 0,8 = 18,6 \text{ м}^2$$

$$F = q \cdot S = 5192 \cdot 18,6 = 96571 \text{ Вт}$$

Суммарно, потери тепла при испытании стального огнезащитного экрана, полностью закрывающего одну из стен печи, составят

$$F_{\text{общ}} = 1563381 + 96571 = 1734575 \text{ Вт}$$

что в 1734575/143299 $\approx$ 12,1 раза больше, чем в печи, где все стены покрыты шамотом.

Для компенсации таких потерь тепла необходимо будет сжигать 1734575/91,27·106 $\approx$ 0,019 м³ или 19 литров газообразного пропана в секунду. Как было сказано выше, данная оценка проведена без учета дополнительных потерь в виде конвективного излучения, химического недожога и пр. А значит, реальный расход газа должен будет превышать 18 л/с, что может являться проблемой для печи, изначально не рассчитанной на такие расходы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 «Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы»
2. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Энергетика и электротехника

Энергетические системы и комплексы

Гарифуллина Н.А., старший преподаватель

(Казанский государственный энергетический университет)

Алихаджиев С.Х., кандидат физико-математических наук, доцент

(Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАСТЕЙ ТУРБИН ДЛЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В статье рассматривается проблема проектирования и разработки ветряных турбин для автономного энергоснабжения потребителей. Предложен инновационный подход, согласно которому форма и профиль ротора турбины были модифицированы с целью непрерывной регулировки угла наклона лопасти и достижения оптимального сочетания сопротивления и подъемной силы, что позволило получить положительный крутящий момент в любой точке вращения. Показано, что критерием статической надежности турбины является запас прочности, а опасное сечение расположено на расстоянии, равном 20–30% от кромки по высоте лопасти.

Ключевые слова: ветрогенератор, лопасти, оптимизация, напряжения.

Garifullina N.A.

Alikhajiev S.H.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF TURBINE BLADES FOR THE UNINTERRUPTED USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article deals with the problem of designing and developing wind turbines for autonomous power supply to consumers. This optimization is based on geometric constraints and careful parameter selection, as a result of which the blades are designed to withstand a combination of centrifugal and aerodynamic loads and at the same time be rigid enough to minimize bending stresses caused by vibration. It is shown that the criterion of static reliability of the turbine is the margin of safety, and the dangerous section is located at a distance equal to 20–30% from the edge in height of the blade.

Keywords: wind generator, blades, optimization, hydrodynamic torque.

Введение

В настоящее время возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, широко применяются для автономной выработки электроэнергии. Использование инновационных конструкций играет важную роль в получении большего количества энергии из различных источников [1–3]. Среди возобновляемых источников энергии ветра является одним из наиболее перспективных направлений и широко используется для выработки электроэнергии в различных регионах. Чтобы улучшить характеристики ветряных турбин, необходимо глубоко

понять влияние таких эксплуатационных параметров, как передаточное отношение (λ), число Рейнольдса (Re) и интенсивность турбулентности (T), на силовые характеристики турбин и их аэродинамику. Таким образом, настоящее исследование направлено на систематическое изучение влияния этих параметров, чтобы обеспечить более глубокое понимание их влияния на аэродинамические характеристики ветряных турбин. Также актуальным остается вопрос проектирования ветровых турбин, предназначенных для автономного электропитания потребителей в децентрализованных районах, где отсутствуют стационарные линии электропередач.

Расчет рабочих параметров турбины

Было исследовано влияние интенсивности турбулентности набегающего потока на динамические нагрузки на лопатки и характеристики турбины. В таблице 1 перечислены используемые рабочие параметры. Интенсивность турбулентности (T) выбирается в пределах от 0 до 30 %, охватывая широкий диапазон: от очень низких значений, относящихся к аэродинамическим трубам с низкой турбулентностью, до умеренно высокой турбулентности в реальных условиях эксплуатации, например, в городских условиях [4, 5].

Рабочие параметры турбины						
λ	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.5
U [м/с]	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
ω [рад/с]	46.5	55.8	65.1	74.4	83.7	102.3
(T) [%]	0–30	0–30	0–30	0–30	0–30	0–30
$Re \cdot 10^5$	1.03	1.21	1.39	1.58	1.76	2.14

Общий анализ проводится для $2,5 \leq \lambda \leq 5,5$, охватывающего передаточные числа от низких до умеренно высоких, в то время как более детальный анализ фокусируется на оптимальном λ , равном 4,0, а также $\lambda = 2,5$, когда лопасть находится в области динамического срыва.

Расчет параметров потока по радиусу турбины

За основу расчета принимаются величины, полученные при расчете турбины по среднему диаметру, предполагая, что течение воздуха в пределах турбины происходит по цилиндрическим поверхностям тока. Было исследовано влияние интенсивности турбулентности набегающего потока на динамические нагрузки на лопатки и характеристики турбины. В то время как форма лопасти турбины приводит в основном к растягивающей нагрузке во время работы, аэродинамическая нагрузка в сочетании с вращением лопасти приводит к значительному изгибу напряжения из-за вибрации лопасти.

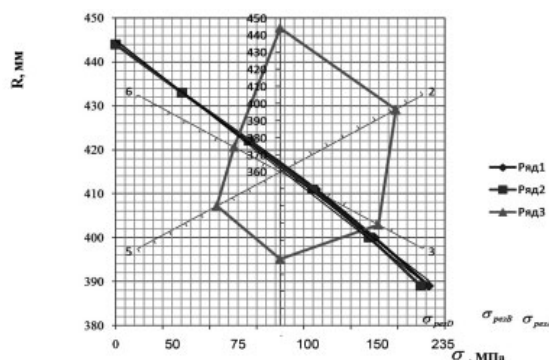


Рис. 1. К расчету напряжений, действующих на лопасть

В результате лопатки должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать сочетание центробежных и аэродинамических нагрузок и при этом быть достаточно жесткими, чтобы минимизировать изгибающие напряжения, вызванные вибрацией. Профиль лопасти оптимизируется путем регулировки контрольных точек для снижения потерь в лопасти. К расчету напряжений, действующих на лопасть, на рис. 1 представлена зависимость радиуса ветрогенератора от создаваемого напряжения растяжения с дополнительным напряжением изгиба от аэродинамических нагрузок.

Критерием статической прочности лопастей служит величина запаса прочности [9], который определяется как отношение:

$$k = \frac{\sigma_{\text{дл}}}{\sigma'_{p3}} = \frac{1060}{235,49} = 4,5.$$

Нормативное значение примем $[k] = 1,5 \dots 2,0$. Условие $k \geq [k]$ выполняется, следовательно, прочностная надёжность лопасти обеспечена.

Выводы

Результаты текущего исследования подчеркивают важность влияния эксплуатационных параметров, то есть λ , Re и (T) , на аэродинамические характеристики VAWT. За основу расчета принимаются величины, полученные при расчете турбины по среднему диаметру, предполагая, что течение воздуха в пределах турбины происходит по цилиндрическим поверхностям тока. Установлено, что в то время, как форма лопасти турбины приводит в основном к растягивающей нагрузке во время работы, аэродинамическая нагрузка в сочетании с вращением лопасти приводит к значительному изгибу напряжения из-за вибрации лопасти. В результате лопатки должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать сочетание центробежных и аэродинамических нагрузок и при этом быть достаточно жесткими, чтобы минимизировать изгибающие напряжения, вызванные вибрацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. Roshan*, "Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine" *J. Energy Resour. Technol.* 142 (1), 20–27 (2020).
2. *M. Asadi* *Energy Convers. Manage.* 238, 114–119 (2021).
3. *Y. Kyojuka, J. Fluid Sci. Technol.* 3, 439–449 (2008).
4. *G. Bangga*, "The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines," *Adv. Theory Simul.* 4, 200–204 (2021).
5. *Y. Wang*, "Investigation on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine" *Renewable Energy* 126, 801–818 (2018).

Химические технологии, науки **о материалах, металлургия**

Процессы и аппараты химических технологий

Успажиев Р.Т., кандидат физико-математических наук, доцент

(Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова)

Саньева А.Д., старший преподаватель (Казанский государственный энергетический университет)

ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯ

Выполнена систематизация и уточнение рекомендаций по проектированию технологической схемы очистки газовых выбросов, а также с точки зрения оптимизации гидродинамических условий её работы. Произведена технико-экологическая оценка эффективности газоочистки при отсутствии сведений о дисперсном составе пыли. Использование при такой оценке эффективного диаметра частиц позволило сблизить экспериментальные и расчетные данные.

Ключевые слова: *эффективность газоочистки; динамический газопромыватель; печь обжига; дисперсные частицы; газовые выбросы.*

Uspazhiev R.T.
Sanieva A.D.

IMPLEMENTATION AND TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE GAS SCRUBBER OPERATION

The systematization and refinement of recommendations for the design of a technological scheme for gas emissions purification, as well as from the point of view of optimizing the hydrodynamic conditions of its operation, have been carried out. A technical and environmental assessment of the effectiveness of gas cleaning was carried out in the absence of information on the dispersed composition of dust. The use of the effective particle diameter in this estimation made it possible to bring the experimental and calculated data closer together.

Keywords: *efficiency of gas cleaning; dynamic scrubber; kiln; dispersed particles; gas emissions.*

Введение

В последние годы в России издан ряд законодательных и директивных документов, резко повышающих требования к охране атмосферного воздуха [1]. Соответственно, изменились условия проектирования оборудования для очистки промышленных выбросов. Промышленные предприятия стремятся к тому, чтобы это оборудование было высокоэффективным, надежным, долговечным и недорогим. Полученные в работах [2, 3] результаты были практически реализованы в производстве обжига известняка при проведении реконструкции системы аспирации дымовых газов печей обжига.

Очистка газов от пыли в промышленности

Для очистки дымовых газов печей обжига известняка применяется разработанный газопромыватель в качестве второй ступени очистки [4]. Перед направлением газа на очистку, окись углерода дожигают в специальной камере. Запыленность очищенного доменного газа должна быть не более 4 мг/м^3 . Для очистки доменного газа от пыли применяется следующая схема (рис.1).

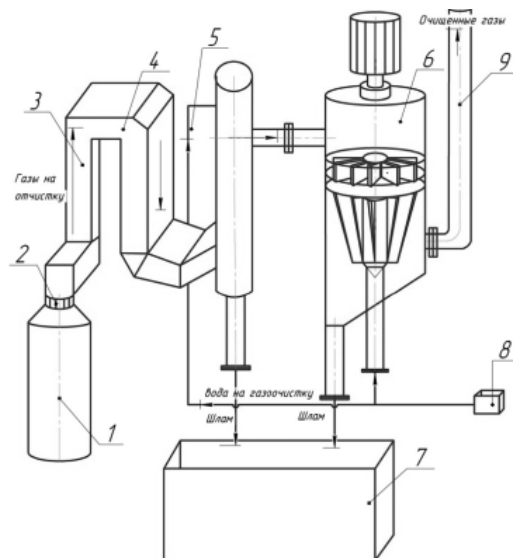


Рис. 1. Технологическая схема очистки газовых выбросов

Газ из колошника печи обжига 1 по газоподам 3 и 4 отводится в систему газоочистки. В центробежном скруббере 5 доменный газ подвергается очистке до конечного пылесодержания от 5 до 10 г/м^3 . Окончательная очистка доменного газа осуществляется в динамическом газопромывателе, где происходит коагуляция мелкодисперсной пыли. Очищенный газ отводится в коллектор чистого газа 9, откуда подается в атмосферу. Осветленный шлам из фильтра-отстойника вновь подается на орошение аппаратов. Результатом внедрения опытно-промышленной установки пылеочистки стало снижение максимальной запыленности газов, выбрасываемых в атмосферу, с 3760 мг/м^3 до 720 мг/м^3 . Выбросы от источников известкового производства сократились до 1400 т/год.

Расчет эффективности газоочистки

Определение эффективности газоочистки сводится к определению эффективного диаметра частиц $d_{\text{эф}}$, полностью улавливаемых аппаратом. В работе [5] получено выражение для определения $d_{\text{эф}}$.

$$d_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\mu_r R_z^3 G^{0,6}}{\rho_{\text{ч}} G \phi R^{1,2} g^{0,6}}},$$

Вероятность сепарации частиц заданного дисперсного состава выражается величиной коэффициента очистки η . Характеристики дисперсного состава пыли представлены на рис. 2.

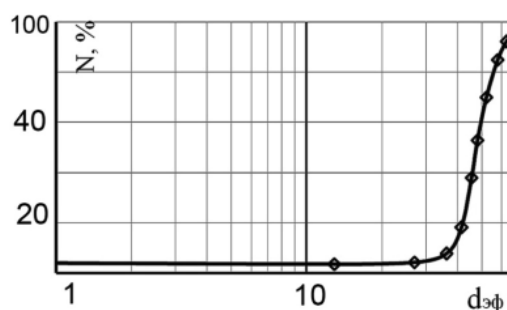


Рис. 2. Содержание частиц диаметром $d \leq d_{эф}$

Эффективность очистки с учетом содержания частиц диаметром $d \leq d_{эф}$ ($N_{эф}$) определяется по формуле:

$$\eta = (100 - N_{эф})/100.$$

Эффективный диаметр частиц значительно меньше их медианного диаметра, обычно вводимого в расчет, что и обуславливает неточность известных зависимостей. Введение эффективного диаметра частиц позволило сблизить экспериментальные и расчетные данные. Ошибка прогноза эффективности очистки находится в пределах $\delta_i = (0,5...+4,5) \%$.

Выводы

Разработаны рекомендации по подбору оптимальных конструктивных параметров газоочистных аппаратов, ряд которых внедрен в различных отраслях промышленности для мокрой очистки газовых выбросов и позволяет на порядок уменьшить расход жидкости на орошение газа. Выполнен расчет эффективности процесса газоочистки при отсутствии сведений о дисперсном составе пыли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указания и нормы технологического проектирования предприятий черной металлургии. Т. 18. Защита атмосферы. Очистка газов от пыли. ВНТП 1-41-00. МЧМ РФ, 2010. 126 с.
2. A. Roshan, "Nondimensional parameters effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine" J. Energy Resour. Technol. 142 (1), 20–27 (2020).
3. M. Asadi Energy Convers. Manage. 238, 114–119 (2021).
4. Y. Kyojuka, J. Fluid Sci. Technol. 3, 439–449 (2008).
5. G. Bangga, "The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of wind turbines," Adv. Theory Simul. 4, 200–204 (2021).

Недропользование и горные науки

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

*Алекина Е.В., кандидат химических наук,
доцент*

*Борисевич Ю.П., кандидат химических
наук, доцент*

*Хохлова Н.Ю., кандидат биологических
наук, доцент*

*(Самарский государственный техниче-
ский университет)*

УДК 622.24

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ СВЕРХТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ И ОЦЕНКИ УТЕЧЕК ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ РФ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Авторами проанализированы результаты обучения сверхточной нейронной сети для распознавания и оценки утечек природного газа на объектах нефте-газовой отрасли с помощью дистанционного зондирования поверхности Земли и намечены пути её развития и совершенствования.

Ключевые слова: анализ, утечки, газ, обучение, нейронные системы.

Alekina E.V.

Borisevich Y.P.

Khokhlova N.Y.

THE ANALYSIS OF TRAINING RESULTS A HIGH-PRECISION NEURAL NETWORK FOR RECOGNIZING AND ASSESSING NATURAL GAS LEAKS AT FACILITIES OF THE OIL AND GAS INDUSTRY OF THE RF USING EARTH REMOTE SENSING

In the article, the authors analyzed the results of training an ultra-precise neural network for recognizing and assessing natural gas leaks at oil and gas industry facilities using remote sensing of the Earth's surface and outlined ways for its development and improvement.

Keywords: analysis, leaks, gas, training, neural systems.

Применение обучающихся сверхточных нейронных сетей для распознавания и оценки утечек природного газа на объектах нефте-газовой отрасли с помощью дистанционного зондирования поверхности Земли в последнее время становится магистральным направлением развития экологического и технологического мониторинга ведущих компаний топливно-энергетического комплекса РФ [1-4].

При этом, наиболее ресурсоемкой и длительной частью процесса разработки систем для поиска утечек природного газа – является именно обучение нейронной сети.

Более того, до сих пор даже точно не установлено необходимое для этого количество итераций, колеблющееся от двух до восьми.

Поэтому представляло интерес проанализировать достигнутые результаты обучения доступной нейронной сети MaskR-CNN для распознавания и оценки утечек природного газа на объектах нефте-газовой отрасли РФ с помощью дистанционного зондирования Земли, основанной на тепловизиционном методе наблюдения.

При обучении нейронной сети возникают проблемы переобучения. Такой процесс снижает точность распознавания пространственных объектов [5]. На рисунке 1 представлен график функций ошибок. Обучение нейронной сети производилось на двух различных типах данных – train и valid. Так, по размеченным изображениям типов данных train нейронная сеть обучается, а по размеченным изображениям – valid нейронная сеть проверяет ошибки обучения. Изначально нейросеть самостоятельно размечает изображение, только затем нейросеть сверяет с уже размеченным человеком изображением. В случае если данные разметки не совпадают, то возникает ошибка обучения.

Линия 1 на рисунке представляет собой ошибки в данных типа valid. Следует добавить, что это необходимо для того чтобы показать ошибки на данных, на которых данная нейронная сеть не обучалась. Как видно из рис.1. линия «скачет», однако при этом одновременно с этим постепенно снижается до момента переобучения.

Линия 2 показывает ошибки по папке train, то есть обученная нейронная сеть проверяет своё обучение на этих же изображениях на которых и обучалась. Чем больше итераций, тем ниже линия, и соответственно, тем меньше ошибок.

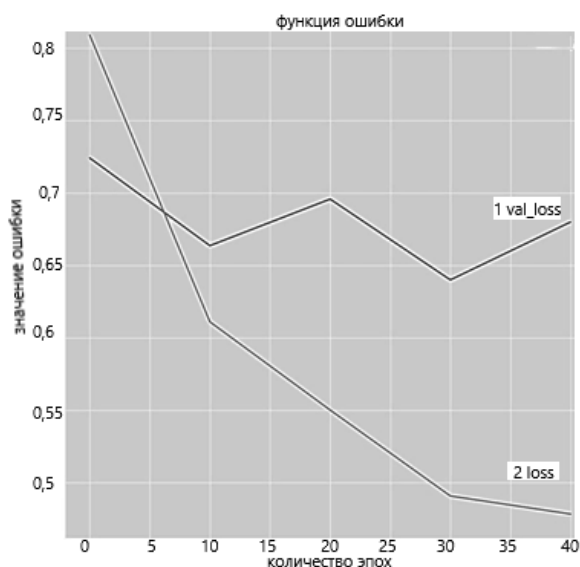


Рис. 1. График зависимости значения ошибки от количества итераций

При обучении на двух итерациях оптимальное количество итераций, при которых нейросеть обучается с наименьшим количеством ошибок равно 4 (на данном графике – 3, при 0 =1).

В данной работе обученная нейронная сеть состоит из несколько типов нейросетей – классификация (mrcnn_class), ограничение объекта (mrcnn_bbox), маска (mrcnn_mask).

На рисунке 2 представлен график функций ошибки MRCNN на обучении нейронной сети, то есть зависимости значения ошибок от количества итераций.

На данном этапе нейронная сеть определяла число ошибок только на одном типе данных train, на котором она же и обучалась.

Как видно из рис. 2 при обучении на пяти итерациях также оптимальное количество итераций, при которых нейронная сеть обучается с наименьшим количеством ошибок, соответствует четырём.

Поскольку графики трёх функций: классификация, ограничение объекта и маска, минимальны в точке 3, то это соответствует четвёртой итерации.

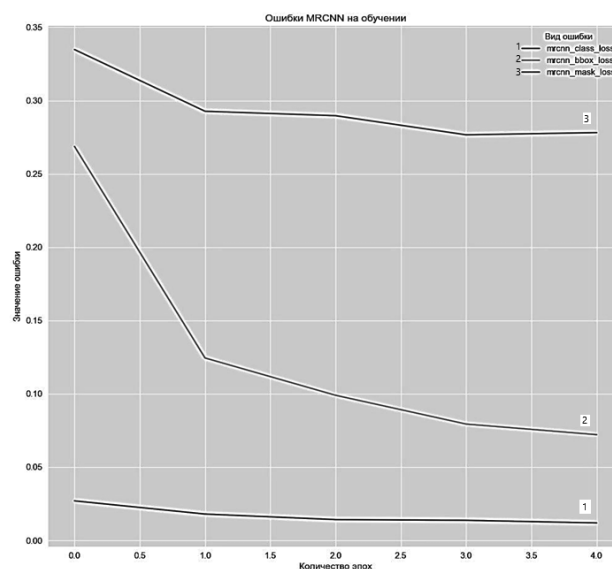


Рис. 2. График зависимости значения ошибки MRCNN от количества итераций

Затем обученная нейронная сеть, состоящая из нескольких типов нейросетей – классификация (mrcnn_class), ограничение объекта (mrcnn_bbox), маска (mrcnn_mask) обучалась на двух типах данных train и valid.

Рисунок 3 показывает ошибки, которые возникают при таком обучении на двух типах данных. Следует заметить, что данная нейронная сеть первоначально проверяет ошибки на папке train, на которой она и обучалась. Именно поэтому график функции на рисунке снижается. Только потом на папке valid – это те изображения, на которых нейросеть не обучалась, размечает и сверяет с размеченным человеком.

Таким образом, можно сделать выводы о том, что при обучении нейронной сети на пяти итерациях оптимальным числом является – 4.

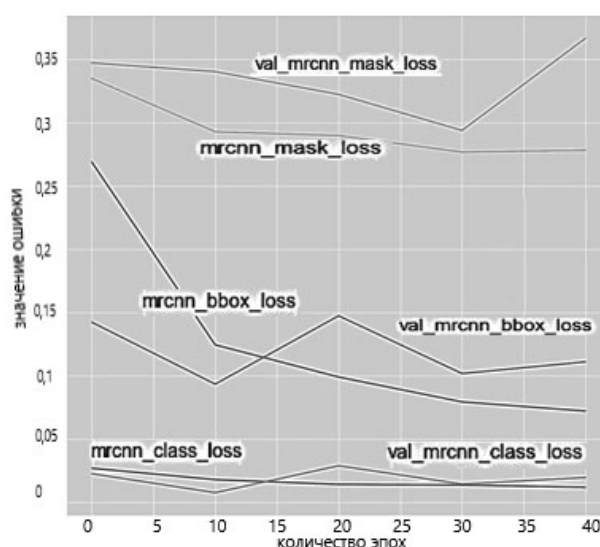


Рис. 3. График зависимости значения ошибки MRCNN на обучении и валидации от количества итераций

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тархов Д.А.* Нейросетевые модели и алгоритмы. // М.: Радиотехника. – 2017. – с. 787.
2. *Долгополов Д. В.* Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУ-ГиТ. – 2020. - №3. С. 151–159.
3. *Тарасов А. С.* Применение сверточных сегментационных нейронных сетей для экологического мониторинга земной поверхности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. - №6. – С. 3–10.
4. *Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А., Забиякин А. С.* Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – №2. – С. 30–35.
5. *Гелиг А.Х., Матвеев А.С.* Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей // М.: СПбГУ – 2017. – с. 224.

*Алекина Е.В., кандидат химических наук,
доцент*

*Борисевич Ю.П., кандидат химических
наук, доцент*

*Хохлова Н.Ю., кандидат биологических
наук, доцент*

*(Самарский государственный техниче-
ский университет)*

УДК 622.24

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА УТЕЧЕК ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ПХГ «КИРЮШКИНО» С ПОМОЩЬЮ ОБУЧЕННОЙ СВЕРХТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Проанализирована эффективность поиска утечек природного газа на ПХГ «Кирюшкино» с помощью обученной сверхточной нейронной сети на основе дистанционного зондирования поверхности Земли.

Ключевые слова: анализ, утечки, газ, обучение, нейронные системы.

Alekina E.V.

Borisevich Y.P.

Khokhlova N.Y.

THE ANALYSIS OF EFFICIENCY NATURAL GAS SEARCHING FOR LEAKS AT UGSF «KIRUSHKINO» USING A TRAINED ULTRA-PRECISION NEURAL NETWORK BASED ON REMOTE SENSING OF THE EARTH SURFACE

The efficiency of searching for natural gas leaks at the Kiryushkino underground gas storage facility was analyzed using a trained ultra-precise neural network based on remote sensing of the Earth's surface.

Keywords: analysis, leaks, gas, training, neural systems.

Применение обучающихся сверхточных нейронных сетей для распознавания и оценки утечек природного газа на объектах нефтегазовой отрасли с помощью дистанционного зондирования поверхности Земли в последнее время становится магистральным направлением развития экологического и технологического мониторинга ведущих компаний топливно – энергетического комплекса РФ [1-4]. Однако, эффективность подобных систем по сравнению с традиционными методами [5] до сих пор воспринимается неоднозначно и порождает немало сомнений.

Поэтому представляло интерес проанализировать достигнутые результаты поиска утечек природного газа на реальном производственном объекте с помощью обученной доступной нейронной сети **MaskR-CNN**, основанной на дистанционном зондировании Земли, с помощью тепловизионного метода наблюдения [6]. В качестве объекта исследования было выбрано подземное хранилище газа (ПХГ) «Кирюшкино» (рис. 1).

Подземное хранилище газа предназначено для регулирования сезонной неравномерности газопотребления и обеспечения надежности газоснабжения.

Производственная деятельность объекта заключается в непрерывности работы по закачке природного газа в подземное хранилище и его отбору. Закачка газа в хранилище производится в период с апреля по сентябрь, отбор в период с октября по март.



Рис. 1. Подземное хранилище газа «Кирюшкино»

При отборе газ, подается по межпромысловому газопроводу в компрессорный цех, и далее на установку сероочистки, а затем на установку газосушки. Прошедший подготовку газ подается на ГРП Аманакского ГРП ООО «Газпром трансгаз Самара» (далее ГРП КС Похвистнево) для транспортировки потребителям в магистральные газопроводы «Похвистнево – Самара I», «Похвистнево – Самара III» и «Похвистнево – Бугуруслан». Закачка осуществляется из магистральных газопроводов «Похвистнево – Самара I» и «Похвистнево – Самара III» через ГРП КС Похвистнево по межпромысловому газопроводу «КС Похвистнево – ПХГ Аманак». В составе компрессорной станции эксплуатируется система технологических газопроводов, система предварительной подготовки газа, компрессорный цех 10 ГК, установка очистки природного газа от сероводорода, установка осушки природного газа, технологическая котельная, система энерго- и теплоснабжения.

Киришкинское ПХГ обустроено в истощенном газоконденсатном месторождении. Вскрытая толщина газонасыщенных коллекторов колеблется от 41,9 до 49,0 м. Пористость коллекторов – 20 %, проницаемость – 330 мД.

Фонд скважин Кирюшкино составляет 38 штук. Производительность Кирюшкинского ПХГ по геолого-техническим параметрам при отборе газа составляет до 120 млн.м³ продолжительностью не более 180 суток, пластовое давление 2,5 МПа.

Компрессорный цех (рис. 2) компримирует газ до значения 25кгс/см². В цеху установлено 4 ГМК типа 10ГКНА 1-11/26, производительность одного агрегата составляет 0,7 млн.м³/сут., мощностью 1500 л.с. Для охлаждения газа применены АВО газа типа АВЗ, на выходе цеха установлены маслоотделители ГС-3 и ГС-4.



Рис.2. Компрессорная станция «Похвистнево»

Установка очистки газа от сероводорода производительностью до 3 млн.м³ газа в сутки с давлением до 24кгс/см² имеет в составе входной газосепаратор ГС-6, два абсорбера К1/1, К1/2, выходной газосепаратор ГС-7, установку регенерации технологического раствора моноэтанолamina.

Установка осушки газа производительностью до 3 млн.м³ с давлением до 24кгс/см² имеет в составе два абсорбера А201/1 и А201/2 установку регенерации технологического раствора диэтиленгликоля.

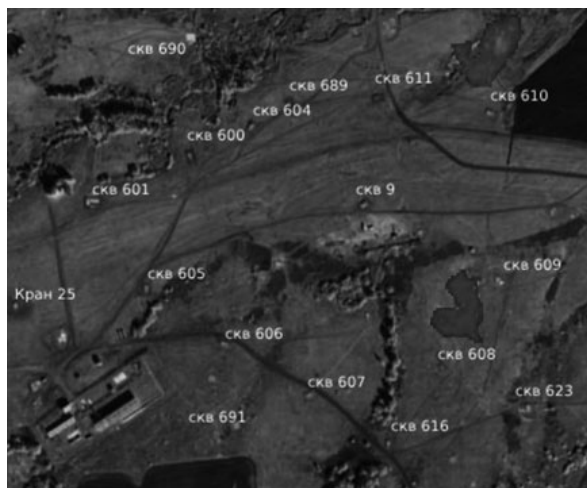


Рис. 3. Подземное хранилище газа с потенциальной утечкой газа

Затем на изображение с помощью специализированной программы было нанесены потенциальные крупные утечки природного газа на скважинах 608 и 610 (рис. 3).

Следующим шагом анализируется изображение подземного хранилища газа, на котором имеются потенциальные источники утечки газа с помощью обученной нейронной сети (рис. 4).

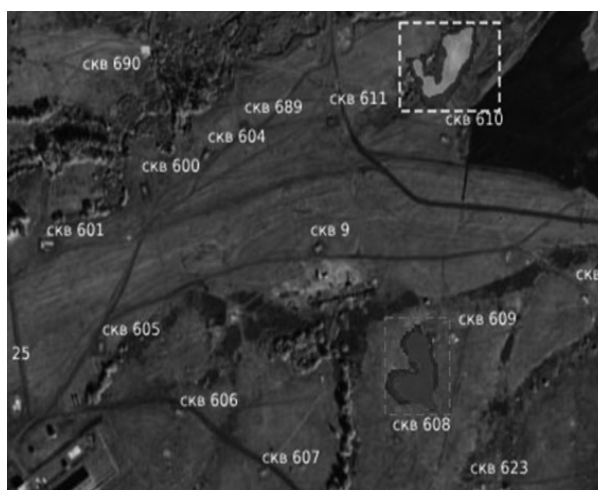


Рис.4. Подземное хранилище газа с детектированными утечками газа

Таким образом, обученная нейронная сеть определяет утечки природного газа, не захватывая лишние области. Для уточнения областей утечки газа возможно увеличение тренировочных размеченных изображений. Также для улучшения обнаружения утечки возможно увеличение числа итераций обучения нейронной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тархов Д.А.* Нейросетевые модели и алгоритмы. // М.: Радиотехника. – 2017. – с. 787.
2. Долгополов Д.В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – № 3. С. 151–159.
3. *Тарасов А.С.* Применение сверточных сегментационных нейронных сетей для экологического мониторинга земной поверхности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 3–10.
4. *Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А., Забиякин А.С.* Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – №2. – С. 30–35.
5. СТО Газпром 2-1.19 -214-2008. Охрана окружающей среды на предприятиях ОАО «Газпром». Производственный экологический контроль. Общие требования. – М.: ИРЦ «Газпром», 2009. – 57 с.
6. *Гелиг А.Х., Матвеев А.С.* Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей // М.: СПбГУ – 2017. – с. 224.

Мараков Д.А., кандидат технических наук, доцент

Адзынова Ф.А., старший преподаватель
Алексеев И.Д.

Скицану Р.А.

(Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина)

Сулейманов Т.И., ведущий специалист
(АО «ВНИИнефть-Западная Сибирь», г. Тюмень)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНУСООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Проблема обводнения горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин при разработке месторождений углеводородов на сегодняшний день становится все более актуальной при обосновании технологического режима их работы. При эксплуатации горизонтальных скважин процесс подтягивания пластовой воды к горизонтальному стволу отличается от процесса конусообразования, происходящего в вертикальных скважинах. Влияние большего количества факторов на продвижение пластовой воды к горизонтальному стволу осложняет получение простых аналитических зависимостей, позволяющих оценить производительность таких скважин, обеспечивающих их эксплуатацию без обводнения в процессе разработки месторождения. В представленной работе проблема конусообразования к горизонтальной скважине с горизонтальным профилем, расположенной в однородном газовом пласте, изучена путем проведения экспериментов на гидродинамической модели фрагмента залежи. Полученные результаты показали, что для достоверного прогнозирования конусообразования в гидродинамической модели необходимо кроме траектории, участков перфорации и диаметра обсадных колонн обязательно задавать параметры сегментов для горизонтального ствола, которые позволят учесть потери давления, возникающие при движении переменного потока природного газа по горизонтальному участку ствола.

Ключевые слова: *горизонтальная скважина, обводнение, гидродинамическое моделирование, конусообразование, безводный дебит, забойное давление, технологический режим.*

Marakov D.A.

Adzynova F.A.

Alekseenko I.D.

Skitsanu R.A.

Suleymanov T.I.

MODELING OF THE CONING PROCESS DURING THE OPERATION OF HORIZONTAL GAS WELLS

Nowadays the problem of water cut of horizontal gas and gas condensate wells during the development of hydrocarbon reservoirs is becoming increasingly important when justifying the technological mode of their operation. When operating horizontal wells, the formation water influx to a horizontal well differs from the coning process that occurs in vertical wells. The influence of a large number of factors on the movement of formation water to a horizontal well makes it difficult to obtain simple analytical relationships that allow assessing the productivity of such wells, ensuring their operation without water cut during field development. In the presented work, the problem of coning in a horizontal well with a horizontal profile located in the homogeneous gas reservoir is studied through experiments on a hydrodynamic model of a reservoir fragment. The obtained results show that in order to consistently predict coning in a hydrodynamic model, it is necessary, in addition to the trajectory, sectional perforation and casing diameter, to

set the parameters of segments for a horizontal wellbore, which preferably take into account the pressure loss that occurs when an alternating flow of natural gas moves along a horizontal section of the wellbore.

Keywords: horizontal well, water cut, hydrodynamic modeling, coning, water-free production rate, bottomhole pressure, technological mode.

При эксплуатации газовых и газоконденсатных скважин возникает необходимость в ограничении производительности скважин. Основными факторами, ограничивающими дебиты добывающих скважин, являются: разрушение призабойной зоны; опасность обводнения скважины; наличие коррозионно-активных компонентов в добываемом газе; образование песчаных и песчано-жидкостных пробок и др. [1] Одним из определяющих факторов для обоснования и выбора технологического режима работы эксплуатационных газовых и газоконденсатных скважин с позиции осложнений при добыче является образование конуса подошвенной воды при разработке залежей массивного, а иногда и пластового типов с последующим обводнением и выходом скважины из эксплуатации.

При эксплуатации вертикальных газовых скважин из-за образования конуса пластовой воды, который, как правило, формируется от газовойдыного контакта (ГВК) к нижним перфорационным отверстиям добывающей скважины (см. рисунок 1а) используется критерий предельной депрессии на пласт, характеризующий работу скважины без обводнения, т.е. устанавливается ограничение производительности скважины по так называемому «предельно безводному» дебиту.

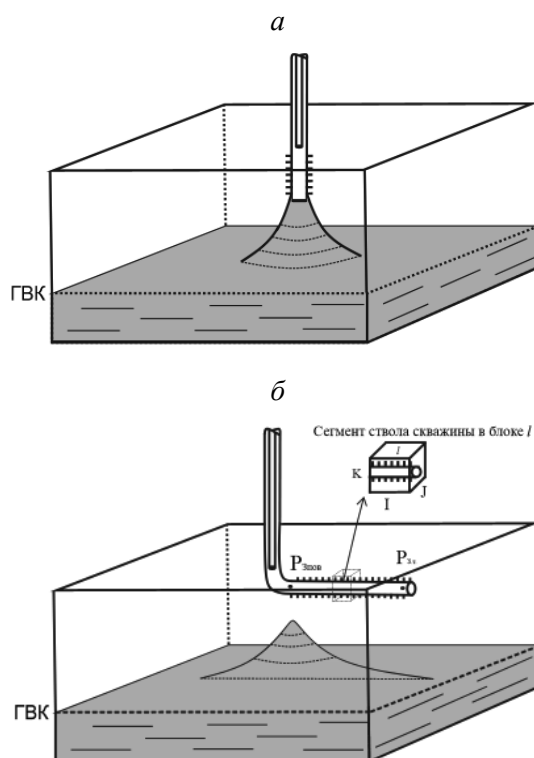


Рис. 1. Процесс образования конуса пластовой воды к добывающей вертикальной (а) и горизонтальной (б) скважине

Для оценки предельно безводного дебита вертикальных скважин, для исключения образования конуса пластовой воды, были разработаны аналитические методы, приведенные в работах отечественных авторов [2], [3] и [4], в которых указано, что конусообразование зависит от: степени вскрытия пласта вертикальной скважиной, т.е. расстояния от нижних перфорационных отверстий до газовойдыного контакта; величины вертикальной проницаемости пласта; свойств пластовых воды и природного газа.

Следует отметить, что аналогичные аналитические методы для определения предельно безводного дебита горизонтальных скважин практически отсутствуют. Это связано в основном с особенностями притока газа и жидкости к горизонтальному стволу (ГС), конструкции горизонтальных добывающих скважин, а также отсутствием фактической информации по поступлению пластовой воды для проверки аналитических формул.

В работе [5] авторами отмечено, что образование конуса газоводяного контакта к горизонтальному стволу не может рассматриваться как для вертикальных скважин. Это связано с тем, что процесс изменения забойного давления по ГС и, следовательно, локального поднятия пластовой воды является нестационарным. Помимо вышеперечисленных факторов, используемых при конусообразовании для вертикальных скважин при эксплуатации горизонтальных дополнительно на подъем пластовой воды, будут влиять такие факторы, как изменение забойного давления по горизонтальному участку ствола, а также его расположение относительно ГВК.

Так, например, для горизонтальных скважин, особенно с большими дебитами и длиной горизонтального участка, забойное давление является переменной величиной, которую необходимо учитывать при моделировании процесса локального поднятия ГВК. Распределение давления по длине горизонтального участка ствола было изучено в работах Алиева З.С. и других [6]÷[9], S. Sinha и др. [10], в которых отмечено, что минимальное забойное давление соответствует первым перфорационным отверстиям, т.е. $P_{з.пов} = P_{з.мин}$ при отсутствии колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) в горизонтальном участке ствола (см. рисунок 1б). Если же НКТ спущена дальше первых перфорационных отверстий, то минимальное забойное давление будет соответствовать башмаку фонтанных труб. Это будет предопределять форму образования конуса подошвенной воды к горизонтальной скважине.

Для оценки локального поднятия пластовой воды к горизонтальному стволу, расположенному в изотропном пласте, была создана гидродинамическая модель со свойствами, близкими свойствам реального газового месторождения и исходными данными, приведенным в таблице 1. С учетом гидродинамического моделирования разработки газовых и газоконденсатных месторождений, в модели принят аквифер с постоянным давлением на ГВК и теми же фильтрационно-емкостными свойствами для моделирования процесса вторжения и конусообразования пластовой воды.

Таблица 1

Параметры гидродинамической модели (ГДМ)

Параметры ГДМ	Значение	Размерность
Размеры ячеек по X	от 10 до 100	м
Размеры ячеек по Y	от 10 до 100	м
Размеры ячеек по Z	1	м
Пористость	0,313	д.ед
Проницаемость по X	300	мД
Проницаемость по Y	300	мД
Проницаемость по Z	300	мД
Начальное пластовое давление	88	бар
Давление на ГВК	88	бар
Начальная насыщенность газом	0,73	д.ед
Начальная насыщенность водой	0,27	д.ед
Запасы газа	25,597	млрд.м ³

При моделировании принято, что горизонтальный ствол расположен на незначительном расстоянии от кровли газоносного пласта (3,5 м от кровли), согласно рекомендации, приведенной в [5], как это показано на рисунке 1. При моделировании объемный приток к участку горизонтального ствола, имеющего перфорационные отверстия в блоке l с координатами (I, J и K) (см. рисунок 1б) определяется по системе уравнений [12]:

$$\begin{cases} Q_p^l(P_{nl}^l, N^l, t) = T^l(t) \cdot M_p(P_{nl}^l, S_{wl}^l, S_{gl}^l)(P_{nl}^l - P_{зab}^l(t)) \\ (P_{nl}^l - P_{зab}^l(t)) = \text{const} \end{cases} \quad (1)$$

где $Q_p^l(P_{nl}^l, N^l, t)$ – объемный приток фазы p через перфорацию в блоке l в пластовых условиях; $T^l(t)$ – проводимость перфорации (коэффициент продуктивности); $M_p(P_{nl}^l, S_{wl}^l, S_{gl}^l)$ – общая подвижность фазы в блоке l ; $P_{nl}^l, S_{wl}^l, S_{gl}^l$ – пластовое давление и насыщенности в блоке l , в котором расположена перфорация; N^l – молярные плотности компонентов в блоке l ; $P_{зab}^l$ – забойное давление в блоке l .

В первом эксперименте горизонтальная скважина моделируется аналогично вертикальным, в частности: задается траектория ствола, интервалы перфорации, диаметр скважины и технологический режим постоянного перепада давления между давлением на эквивалентном радиусе и забойным давлением равного 0,01 МПа. Это означает, что при решении притока газа к горизонтальному стволу в гидродинамической модели не учитывается распределение давления по горизонтальному участку скважины, т.е. забойное давление на торце ствола и у точки поворота будет одинаковым, что приводит к результатам образования конуса воды и распределения давления, представленным на рисунках 3 и 4.

Следует отметить, что согласно результатам расчетов распределение давления (см. рисунок 3) имеет форму правильного эллипса, а подтягивание конуса подошвенной воды происходит к первым и последним перфорационным отверстиям, согласно схематизации, представленной в [11] для скважины бесконечной проводимости. В таблице 2 приведены полученные результаты первого эксперимента, где $P_{зab}^l$ – средневзвешенное забойное давление в интервале перфораций, P_{nl}^l – средневзвешенное пластовое давление в блоках, где расположены интервалы перфорации, $P_{пл}$ – средневзвешенное значение пластового давления; $Q_{г\ перф}$ – средневзвешенное значение удельного дебита газа в интервале; $Q_{г\ сумм}$ – суммарный дебит по газу в интервалах перфораций.

Таблица 2

Распределение давления и притока газа к горизонтальному стволу

Номера блока:	1–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	31–35	36–40	41–45	46–50
$P_{зab}^l$, МПа	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189	8,189
P_{nl}^l , МПа	8,211	8,200	8,198	8,197	8,197	8,197	8,197	8,198	8,199	8,207
Рпл, МПа	8,214	8,202	8,200	8,199	8,198	8,198	8,199	8,200	8,202	8,210
Qг сумм, тыс.м ³	1762,4	1518,1	1324,3	1167,3	1026,0	891,1	756,6	616,5	616,5	462,3
Qг перф, тыс.м ³	48,9	38,8	31,4	28,3	27,0	26,9	28,0	30,8	37,3	55,1

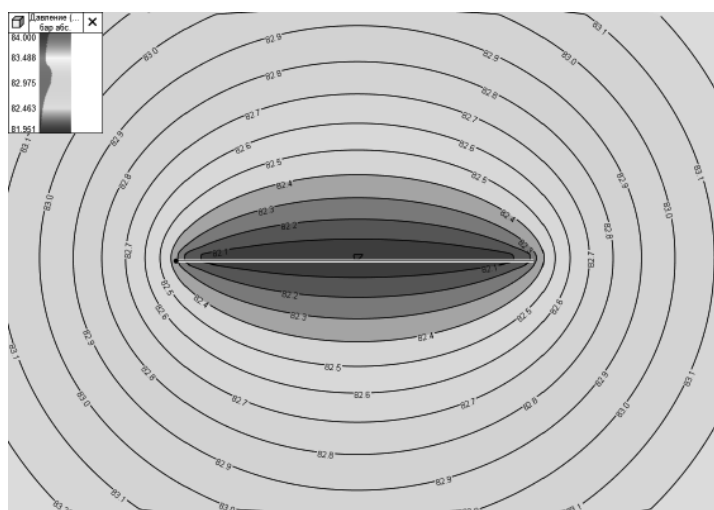
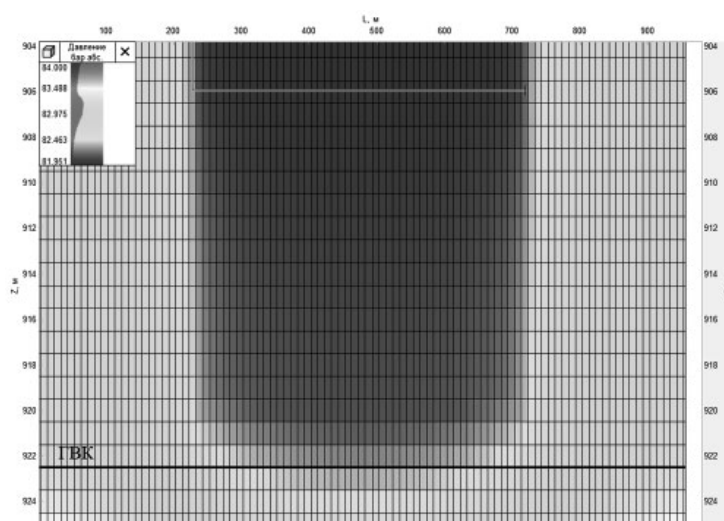


Рис. 3. Форма дренирования горизонтальной скважины

a



б

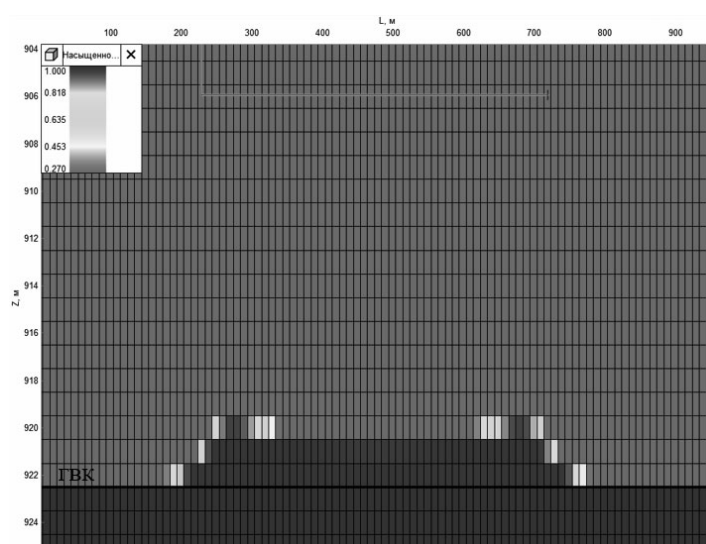


Рис. 4. Распределение давления (а) и насыщенность водой в ячейках (б) в разрезе вдоль скважины

Применяемое в эксперименте граничное условие ($P_3(L_r) = \text{const}$) недопустимо в связи с тем, что при бесконечном увеличении длины горизонтального участка бесконечно растет дебит, что приводит к завышенному значению производительности добывающей скважины. В связи с этим при моделировании конусообразования необходимо учитывать распределение давления по стволу скважины.

Полученное распределение давления и конусообразование не может быть использовано для поиска аналитических зависимостей предельно безводного дебита горизонтальной скважины, так как не отражает физическую сущность подтягивания подошвенной воды к горизонтальному стволу и может приводить к значительным погрешностям или расхождениям с реальными замерами потерь давления в добывающих горизонтальных газовых скважинах.

Для учета распределения давления по стволу горизонтальной скважины при формировании конуса подошвенной воды был проведен второй эксперимент на этом же фрагменте залежи, где при моделировании скважины были заданы дополнительные параметры к ее конструкции: диаметр и глубина спуска обсадной колонны, а также диаметр и глубина спуска НКТ. В приведенном эксперименте глубина спуска НКТ была задана на глубине, соответствующей концу вертикального участка скважины. В качестве начальной точки для расчета изменения забойного давления по длине горизонтального участка ствола использовались первые перфорационные отверстия. Также следует отметить, что в модели горизонтальный участок был разделен на сегменты по 10 м каждый, соответствующей размерам ячейки по оси расположения горизонтального ствола, т.е. на 50 сегментов, в каждом из которых рассчитывалось давление с учетом переменного притока. Для учета распределения давления по стволу скважины с учетом их потерь на гидростатику, трение и ускорение потока Р флюида система (1), дополняется следующими уравнениями [12]:

$$P_{заб}^l = P^{l-1} - \Delta P_l \quad (2)$$

$$\Delta P_l = \alpha \cdot \Delta P_H^l + \beta \cdot \Delta P_f^l + \Delta P_A^l \quad (3)$$

где $P_{заб}^{l-1}$ – давление в $l-1$ сегменте; ΔP_l – общие потери давления в l сегменте; α – коэффициент коррекции гидростатического перепада давления; ΔP_H^l – потери давления на гидростатику в l сегменте; β – коэффициент коррекции перепада давления, вызванного трением; ΔP_f^l – потери давления на трение в l сегменте; ΔP_A^l – перепад давления, вызванный ускорением потока смеси в l сегменте.

Согласно полученным результатам, распределение давления по стволу и в блоках, через которые проходит скважина, формируется согласно теории, описанной в [5]÷[10] (см. рисунок 5 и 6), а конус подошвенной воды подтягивается к первым перфорационным отверстиям. В таблице 3 приведены полученные результаты второго эксперимента, где $P_{заб}^l$ – средневзвешенное забойное давление в интервале перфораций, $P_{пл}^l$ – средневзвешенное пластовое давление в блоках, где расположены интервалы перфорации, $P_{пл}$ – средневзвешенное значение пластового давления; $Q_{г\ перф}$ – средневзвешенное значение удельного дебита газа в интервале; $Q_{г\ сумм}$ – суммарный дебит по газу в интервалах сегментов.

Таблица 3

Распределение давления и притока газа к горизонтальному стволу

Номера блока:	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50
$P_{заб}^l$, МПа	8,086	8,186	8,231	8,257	8,274	8,287	8,297	8,304	8,308	8,310
$P_{пл}^l$, МПа	8,165	8,203	8,239	8,262	8,280	8,291	8,300	8,307	8,313	8,319
$P_{пл}$, МПа	8,171	8,206	8,241	8,264	8,280	8,292	8,301	8,309	8,314	8,321

Продолжение таблицы 3

Qг сумм, тыс.м ³	1774,5	1030,2	726,7	576,1	481,4	410,9	350,9	293,0	293,0	229,0
Qг перф, тыс.м ³	148,9	60,7	30,1	18,9	14,1	12,0	11,6	12,8	17,0	28,8

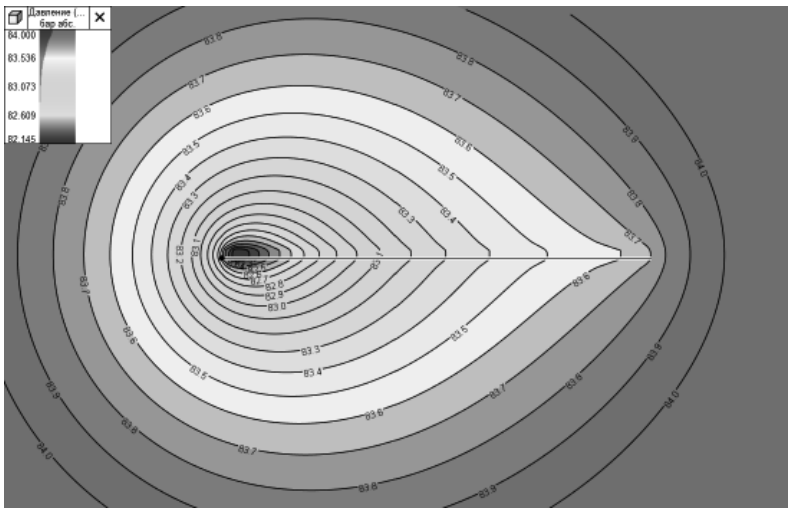
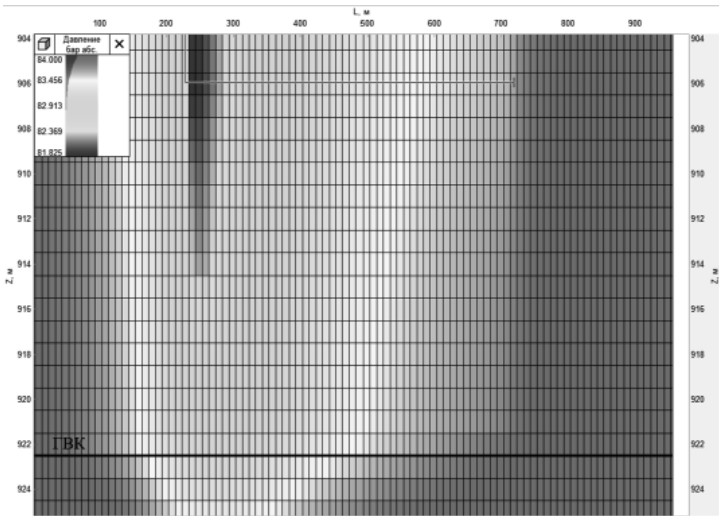


Рис. 5. Форма дренирования горизонтальной скважиной с учётом конструкции

Полученные результаты проведенных экспериментов по оценке формирования конуса подошвенной воды к горизонтальному стволу, вскрывающему однородный газовый пласт, позволяют сделать следующие выводы:

1. При моделировании горизонтальной скважины с постоянным забойным давлением по длине горизонтального участка для оценки конусообразования приводит к тому, что минимальное давление в зоне размещения скважины соответствует середине горизонтального ствола. При этом подтягивание конуса пластовой воды происходит в первую очередь к началу и концу интервала перфорации. Такое распределение давления и притока не может быть использовано для получения аналитической зависимости предельно безводного дебита для горизонтальных скважин.

a



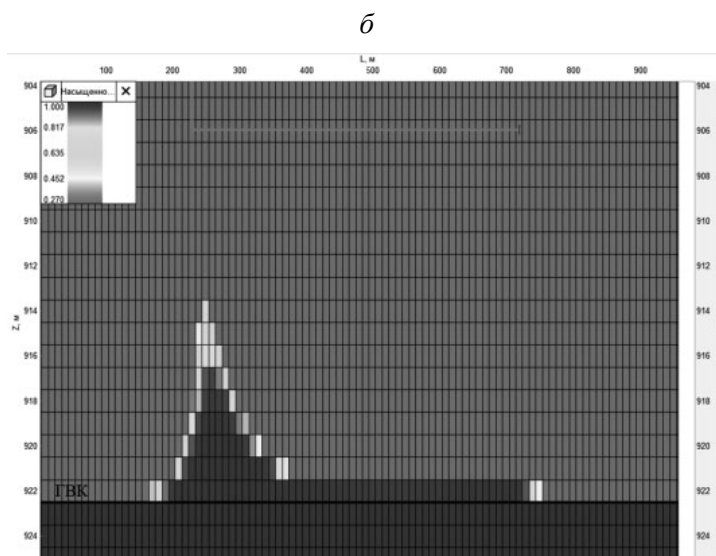


Рис. 6. *Распределение давления (а) и насыщенность водой в ячейках (б) в разрезе вдоль скважины (с учетом конструкции скважины)*

2. Согласно результатам, полученным во втором эксперименте, учет потерь давления на гидростатику, трение и ускорение потока приводит к верному формированию депрессионной воронки и подтягиванию конуса подошвенной воды к первым перфорационным отверстиям.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при совместном моделировании притока в пласте и распределении давления в стволе можно спрогнозировать с приемлемой точностью процесс конусообразования при эксплуатации горизонтальной газовой скважины.

В дальнейшем полученную модель можно использовать для вывода эмпирической зависимости для оценки безводного дебита горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин с учетом основных параметров, влияющих на процесс подтягивания подошвенной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермилов О.М., Алиев З.С., Ремизов В.В., Чугунов Л.С. Эксплуатация газовых скважин. – М.: Наука, 1995. – 359 с.
2. Каширина К.О., Забоева М.И., Телков А.П. Методика расчет предельных безводных дебитов вертикальных газовых скважин при нелинейном законе фильтрации и наличии экрана. Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (часть 2).
3. Закиров С.Н., Ланук Б.Б. Проектирование и разработка газовых месторождений. – М.: Недра, 1974 г. – 379 с.
4. Телков А.П., Стклянин Ю.И. Образование конусов воды при добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1965. – 163 с.
5. Алиев З.С., Шеремет В.В. Определение производительности горизонтальных скважин, вскрывших газовые и газонефтяные пласты. М.: Недра. 1995. – 131 с.
6. Алиев З.С., Марakov Д.А., Котлярова Е.М., Самуйлова Л.В., Бондаренко В.В., Исмаилов Р.Н. Теоретические и технологические основы применения горизонтальных скважин для освоения газовых и газоконденсатных месторождений. – М.: Недра, 2014. – 442 с.
7. Алиев З.С., Максименко А.Ф., Марakov Д.А., Алиев Н.Ш. Теоретические и практические основы анализ исходных данных и рекомендации по их использованию при прогнозировании показателей разработки газовых месторождений с применением горизонтальных скважин. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – 252 с.

8. *Алиев З.С., Мараков Д.А., Алиев Н.Ш.* Влияние на достоверность дебита горизонтальной скважины изменения забойного давления по длине горизонтального ствола при вскрытии высоко- и низкопродуктивных пластов. *Главный энергетик*; 2021; 2: 41-48.
9. *Алиев З.С., Мараков Д.А.* Достоверность величины дебита горизонтальной газовой скважины при изменении депрессии на пласт по длине горизонтального участка. *Нефть и газ: опыт и инновации*; 2018; 2 (1): 3-28.
10. *S. Sinha, R. Kumar, L. Vega, Y. Jalali:* «Flow Equilibration Towards Horizontal Wells Using Downhole Valves,» paper SPE 68635, prepared at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia (April 17-19, 2001).
11. *Joshi S.D.* Horizontal wells technology/ S.D. Joshi. – Oklah'oma, 1991.
12. Техническое руководство тНавигатор 23.4. Рок Флоу Динамикс. 2023. – 4152 с.
13. URL: <https://support.rfdyn.ru/?release=23.4&type=manual&file=tNavUserManualRussian.pdf> (дата обращения: 22.02.2024).

*Хавкин А.Я., доктор технических наук,
профессор*

*(Российский университет дружбы на-
родов имени Патриса Лумумбы)*

*Хавкин Б.А., старший преподаватель
(Российский государственный универ-
ситет нефти и газа (национальный ис-
следовательский университет) имени
И.М. Губкина)*

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ НА ПОВЫШЕНИЕ НЕФТЕДОБЫЧИ ПОЛИМЕРНЫМИ РАСТВОРАМИ

*Приведены результаты численных расчетов вытеснения нефти различными полимерными раство-
рами, включая псевдопластичный. Показана значительная роль капиллярного гистерезиса как резуль-
тата взаимодействия фаз и породы и высокая эффективность применения полимерных растворов в
нефтедобыче.*

Ключевые слова: нефть, месторождение, расчеты, дополнительная добыча.

Khavkin A. Ya.

Khavkin B. A.

THE EFFECT OF CAPILLARY FORCES ON THE INCREASE IN OIL PRODUCTION BY POLYMER SOLUTIONS

*The results of numerical calculations of oil displacement by various polymer solutions, including pseudo-
plastic, are presented. The significant role of capillary hysteresis as a result of the interaction of phases and
rock and high efficiency of the use of polymer solutions in oil production has been shown.*

Keywords: oil, field, calculations, additional production.

В работе проведено математическое моделирование эффективности вытеснения неф-
ти различными полимерными растворами (системами) на основе элемента пласта [1].
Математическое моделирование полимерных технологий повышения нефтеотдачи реализо-
вывали на основе [2], а расчеты проводили с помощью программного комплекса tNavigator
компании Рок Флоу Динамикс (Москва-Тюмень) [3]. Были рассчитаны варианты добычи неф-
ти (таблица) из рассматриваемого в [1] участка за период 40 лет при различных значениях
начального градиента фильтрации нефти, определяемого как результат взаимодействия фаз
и породы [4–9].

Как следует из результатов расчетов для вязкости нефти 20 мПа·с, расчетное значение коэф-
фициента извлечения нефти (КИН) без учета капиллярного гистерезиса вполне соответствует
ожидаемому значению 0,3 [4–6]. При этом применение полимерных технологий дает прирост
нефтеизвлечения на уровне 3% от извлекаемого при заводнении объема нефти.

Учет же капиллярного гистерезиса в виде начального градиента 0,001 МПа/м для филь-
трации нефти показывает существенное уменьшение итогового КИН до 0,22. Прирост добычи
за счет применения полимерных технологий составляет 7–9%, что соответствует промыслово-
му опыту [4–6]. При больших значениях начального градиента вследствие капиллярных сил
значения нефтеизвлечения очень малы, что говорит о завышенном значении такого началь-
ного градиента для такой вязкости нефти.

При вязкости нефти 100 мПа·с, расчетное значение КИН без учета капиллярного гистерезиса (таблица) вполне соответствует ожидаемым из промыслового опыта значению 0,22 [4–6]. Учет капиллярного гистерезиса в количестве 0,001 МПа/м уменьшает КИН до 0,17 при заводнении и росте КИН до 0,18–0,19 при применении полимерных технологий. Увеличение же нефтедобычи при этом составляет 5–10% от нефтедобычи при заводнении. С ростом начального градиента – КИН еще уменьшается, а прирост за счет полимерных технологий значительно увеличивается.

Таблица 1

Результаты расчетов на момент 40 лет от начала разработки для различных закачиваемых агентов с различным начальным градиентом для фильтрации нефти в пористой среде

Начальный градиент, МПа/м	Параметр	Без полимера	Полимер	Псевдопластик
Вязкость нефти 20 мПа·с				
0	КИН	0,294	0,304	0,304
	Доп. добыча, %	0	3,32	3,49
0.001	КИН	0,203	0,217	0,223
	Доп. добыча, %	0	7,12	9,71
0.003	КИН	0,072	0,112	0,114
	Доп. добыча, %	0	54,5	57,4
Вязкость нефти 100 мПа·с				
0	КИН	0,217	0,224	0,227
	Доп. добыча, %	0	3,22	4,79
0.001	КИН	0,174	0,182	0,191
	Доп. добыча, %	0	4,64	9,55
0.003	КИН	0,082	0,102	0,107
	Доп. добыча, %	0	24,7	30,9

Несколько вариантов расчетов проведены для особого ньютоновского «полимера 2», вязкость которого равна вязкости раствора псевдопластичного полимера концентрации 1,45% (средней по закачиваемой концентрации полимера) при скорости 0,37 м/сут в скважине. Вязкость его составляет 60 мПа·с при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 39 мПа·с при $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты расчетов показали, что применение такого полимера менее эффективно, чем псевдопластичного.

Как показали расчеты, применение полимерных растворов даже в небольших относительно порового объема количествах (на уровне 10%) значительно сказывается на дополнительной добыче в ближайшее к началу закачки 1,5–2 года. Накопленный эффект от закачки 10%-ного объема полимеров замечен и после 10 лет заводнения. На рисунке показана итоговая дополнительная добыча нефти (относительно добычи при заводнении) в зависимости от величины капиллярных сил.

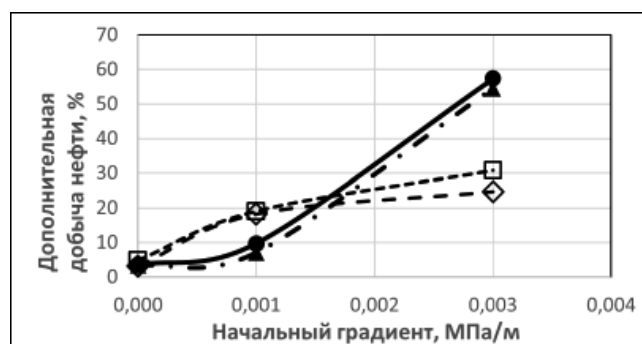


Рис. 1. Зависимость дополнительной добычи нефти от начального градиента для нее

—▲— Полимер, $\mu=20$ мПа·с —●— Псевдопластик, $\mu=20$ мПа·с
—◆— Полимер, $\mu=100$ мПа·с —□— Псевдопластик, $\mu=100$ мПа·с

Как следует из рисунка, значительное увеличение нефтеизвлечения за счет применения полимерных растворов ожидается при сложном коллекторе (высоком значении начального градиента для нефти) и невысокой вязкости нефти на уровне 20 мПа·с. При более высоких значениях вязкости нефти роль закачки полимерных растворов объемом уровня 10% составляет около 20%. При этом эффективность применения полимерных растворов растет с ухудшением свойств пластовой системы (ростом капиллярного гистерезиса). Применение псевдопластичных полимерных растворов несколько увеличивает эффективность вытеснения нефти.

Значения величины капиллярного гистерезиса могут быть связаны с газонасыщенностью нефти и количеством в ней асфальто-смолистых компонентов. Следовательно, учет особенностей пластовой системы (например, уточнение величины капиллярного гистерезиса путем математического моделирования на основе промысловых или лабораторных данных, как в [1]) даст более объективную оценку эффективности применения полимерных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хавкин А.Я., Хавкин Б.А. Численный анализ ОНР на месторождении Жалгистобе // Естественные и технические науки.— 2024.— № 8.— с.194-202.
2. Хавкин А.Я. Математическое моделирование физико-химических технологий повышения нефтегазоотдачи // Учебное пособие. Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. — 2021. — 428 с.
3. Программный комплекс тНавигатор / Рок Флоу Динамикс // Москва-Тюмень, Интернет, URL: <https://rfdyn.ru/>.
4. Хавкин А.Я. Гидродинамические основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами // М.: МО МАНПО. — 2000. — 525 с.
5. Хавкин А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа / Под ред. чл.-корр. РАН Г.К.Сафаралиева // М., ИИКИ, 2010, 692 с.
6. Хавкин А.Я. Основы нефтегазодобычи // Учебное пособие МГУ им. М.В. Ломоносова, УдГУ, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, М.: Нефть и газ. — 2017. — 394с.
7. Хавкин А.Я. Влияние пористой среды на нелинейность фильтрации // Естественные и технические науки, 2018, № 9. — с.44–49.
8. Хавкин А.Я., Хавкин Б.А. Влияние неньютоновских свойств нефти на КИН при вытеснении нефти разноминерализованными полимерными растворами // «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям». Материалы VI Международной Конференции в г. Москва 20–21 ноября 2018г., М.: ОАО «Творческая мастерская», 2018. — с. 159–162.
9. Хавкин А.Я. Физика нефтегазовых пластов и нелинейные явления // Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина. — 2019. — 288 с.

*Хавкин А.Я., доктор технических наук,
профессор*

*(Российский университет дружбы на-
родов имени Патриса Лумумбы)*

*Хавкин Б.А., старший преподаватель
(Российский государственный универ-
ситет нефти и газа (национальный ис-
следовательский университет) имени
И.М. Губкина)*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОПР НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЖАЛГИСТОБЕ

Приведены результаты численного моделирования опытно-промышленных работ (ОПР) на модели месторождения Жалгистобе. В результате закачки псевдопластичной полимерной системы на опытном участке казахского месторождения Жалгистобе была получена за 1,5 года дополнительная добыча нефти в количестве 2180 т. Сравнение расчетов с промысловыми данными позволило установить начальный градиент для фильтрации нефти 0,006 МПа/м, при котором результаты численного моделирования подтвердили полученные промысловые данные, показав дополнительную добычу в количестве 2190 т.

Ключевые слова: нефть, месторождение, расчеты, дополнительная добыча.

Khavkin A. Ya.

Khavkin B. A.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EIW AT THE ZHALGISTOBE FIELD

The results of numerical modeling of experimental industrial works (EIW) on the model of the Zhalgistobe deposit are presented. As a result of the injection of a pseudoplastic polymer system at the experimental site of the Kazakh Zhalgistobe metrogeneration, additional oil production in the amount of 2,180 tons was obtained in 1,5 years. Comparison of calculations with field data allowed us to establish an initial gradient for oil filtration of 0.006 MPa/m, at which the results of numerical modeling confirmed the obtained field data, showing additional production in 1,5 years in the amount of 2,190 tons.

Keywords: oil, field, calculations, additional production.

С целью повышения эффективности заводнения на месторождении Жалгистобе на участке нагнетательной скв. 218 в декабре 2019 г. были осуществлены опытно-промышленные работы (ОПР) по реализации полимерной технологии с использованием псевдопластичного полимера [1–3]. Общий объем закачанной композиции в скв. 218 составил 400 м³ при меняющейся концентрации 0,5–1,7 % (5,3 т сухого реагента). Находящиеся рядом нагнетательные скважины практически не изменили режимы работы. Оцененный по методу характеристик вытеснения [4, 5] эффект через 1,5 года составил 2180 т дополнительно добытой нефти.

Продуктивные отложения месторождения Жалгистобе представлены неравномерным чередованием слабосцементированных песчаников и алевролитов, карбонатных песчаников и алевролитов, глин и единых тонких прослоев мергеля и карбонатных пород. Разброс проницаемости составляет 0,03–7,4 мкм². Вязкость нефти в пластовых условиях 846 мПа·с. Пласт залегает на глубине 430 м. Коэффициент расчлененности 4,5, коэффициент песчаности 0,6. Добывающие скважины характеризуются низкими дебитами по нефти 1–7 т/сут и высокой обводненностью 60–90%, которая стабильно росла с самого начал разработки. Приёмистость большинства скважин составляет 60–120 м³/сут [2].

Математическое моделирование полимерных технологий повышения нефтеотдачи реализовывали на основе [6], а расчеты проводили с помощью программного комплекса tNavigator компании Рок Флоу Динамикс (Москва–Тюмень) [7].

Предполагается, что давление в системе не падает ниже давления насыщения, поэтому при создании фильтрационной модели принят вариант трехфазной трехмерной фильтрационной модели нелетучей нефти (Black Oil) без учета газа, т.е. в ГДМ рассматриваются три компонента – нефть-вода-полимер и используется температурная версия (temp). Такое сочетание позволяет одновременно рассчитывать воздействие закачки полимера и нагрева среды.

Рассматриваются четыре невязимосвязанных пропластка, разделенных непроницаемыми прослоями. Схема расположения скважин приведена на рис. 1, одна вертикальная нагнетательная скважина I1 и шесть вертикальных добывающих скважин P1–P6. Добывающие скважины работают совместно-раздельно по каждому пропластку, закачка ведется суммарно по всем пропласткам.

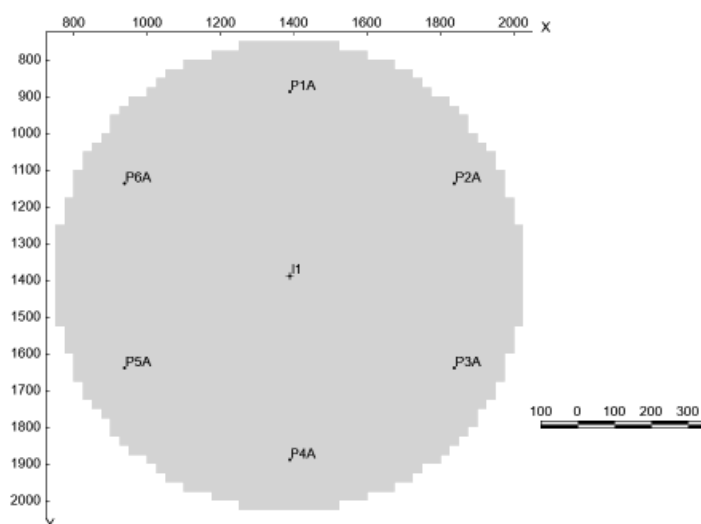


Рис. 1. Расположение скважин и общий вид сверху 3D модели

В табл. 1 приведены геологические параметры, заложенные в гидродинамическую модель, общий вид 3D модели показан на рис. 2. В табл. 2 приведены параметры сетки фильтрационной модели. Для системы нефть-вода форма кривых относительных фазовых проницаемостей (рис. 3) задавалась в соответствии с работой [8]. В табл. 3 приведены основные параметры нефти. Зависимость вязкости нефти от температуры в пластовых условиях соответствует [9] (рис. 4).

Таблица 1

Геологические параметры для расчета

Объект	Толщина, м	Проницаемость, мкм ²	Пористость, д.ед.	Водонасыщенность, д.ед	Радиус контура, м
1	3	0,3	0,27	0,7	500
2	2	0,9	0,33	0,7	500
3	5	1,3	0,38	0,7	500
4	5	0,7	0,31	0,7	500

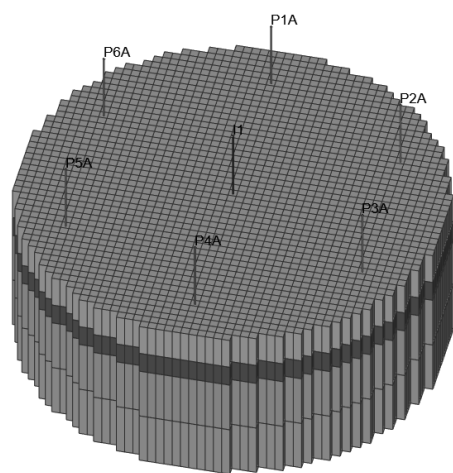


Рис. 2. Общий вид 3D модели. Разными цветами показаны 4 пропластка

Таблица 2

Геометрическая размерность сетки фильтрационной модели

Количество ячеек модели			Количество ячеек, тыс.шт.		Средний размер ячеек, м
I	J	K	Всего	Активных	X-Y
112	112	7	87808	8252	25

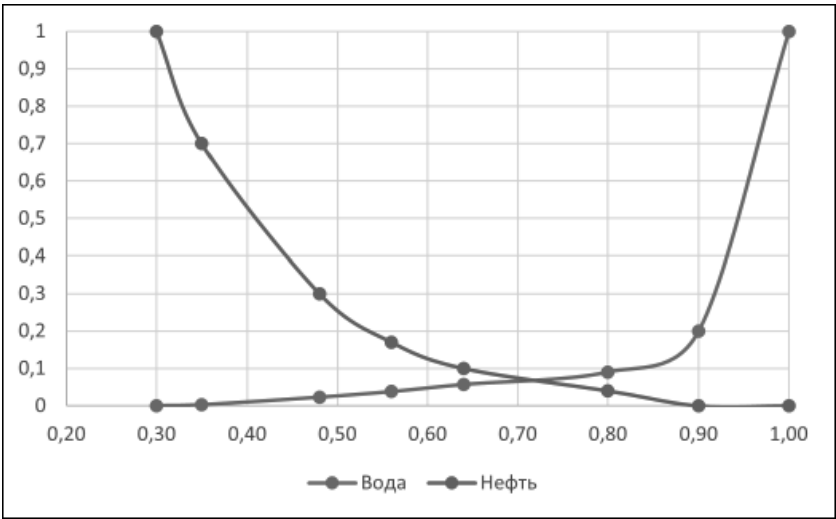


Рис. 3. Фазовые проницаемости в ГДМ

— ★ — Вода — ● — Нефть

Таблица 3

Средние значения основных физических свойств нефти

Давление насыщения, МПа	Газосодержание		Объёмный коэффициент	Усадка нефти, %	Плотность нефти в пластовых условиях, г/см ³	Плотность дегазированной нефти при 20°С, г/см ³	Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с	Коэффициент сжимаемости, 10 ⁻⁴ 1/МПа	Коэффициент растворимости, м ³ /м ³ × МПа
	м ³ /т	м ³ /м ³							
1,14	3,33	3,12	1,016	1,58	0,929	0,944	845,7	26,38	2,68

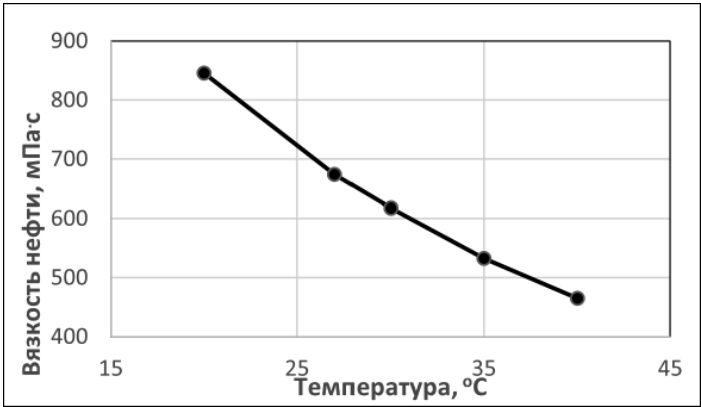


Рис. 4. Зависимость вязкости нефти от температуры при пластовом давлении

Свойства воды: объемный коэффициент 1; сжимаемость $4 \cdot 10^{-6}$ 1/МПа; вязкость 1 мПа·с при 20°С (при пластовом давлении) и 0,653 мПа·с при 40°С [10]. На рис. 5 показана зависимость вязкости воды от температуры [10].

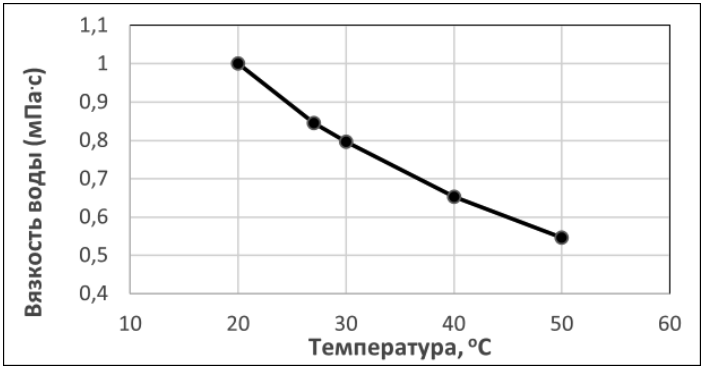


Рис. 5. Вязкость воды от температуры (°C) в пластовых условиях

Рассмотрим зависимость вязкости полимерной системы от концентрации. Путем аппроксимации экспериментальных данных [11] были построены графики зависимости вязкости полимерной системы от концентрации с учетом влияния температуры [11, 12] (рис. 6):

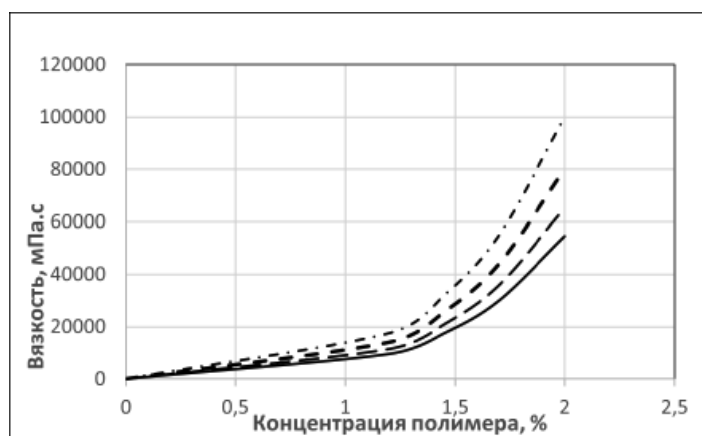


Рис. 6. Вязкость раствора полимера при различных температурах (скорость сдвига=1,2 с⁻¹)

— · — · — 20 град. С - - - - 30 град. С - · - · - 35 град. С — — — — 40 град. С

Динамическая вязкость полимерной неньютоновской системы задается как зависимость от скорости движения и концентрации:

$$\mu_0 = \mu_{\text{воды}} * \mu(C) * \mu(U)$$

где $\mu_{\text{воды}}$ — вязкость воды; μ_0 — вязкость водного раствора. Значения для построения зависимости вязкости от скорости движения зададим экспериментально. Скорость движения будем рассчитывать на основе постоянной приемистости нагнетательной скважины $Q = 100$ /сут. Учитывая реологические свойства неньютоновского полимера и зависимость от концентрации [11, 13], получим зависимость для температуры 20°C (рис. 7.). Для псевдопластичного раствора полимера учитывалась зависимость вязкости от скорости, приведенная на рис. 7.

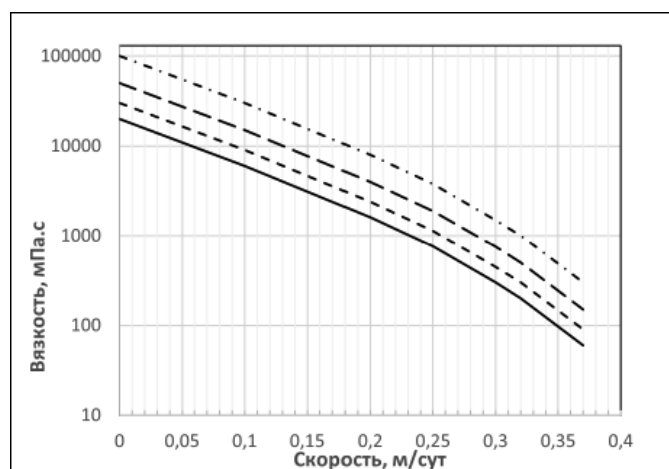


Рис. 7. Зависимость вязкости раствора псевдопластичного полимера от скорости при различных концентрациях в пластовых условиях

— C=1.2% - - - - C=1.45% - · - · - C=1.7% · · · · C=2%

Из рис. 7 и рис. 5 получим вязкости псевдопластичного раствора полимера для скорости 0,37 м/сут, соответствующей приемистости нагнетательной скважины 100 м³/сут (табл. 4).

Таблица 4

Вязкость псевдопластичного раствора полимера (мПа·с) при скорости 0,37 м/сут.

C, %	Температура, °C			
	20	30	35	40
1,2	60	48	44	39
1,45	90	72	66	59
1,7	150	120	110	98
2	300	240	219	196

Удельная теплоемкость нефти: 1,7 кДж/кг/°К [5], воды: 4,2 кДж/кг/°К [14]. Удельная теплоемкость породы: 0,8 кДж/м³/°К [15]. Сжимаемость породы: 0,0004 МПа⁻¹ [16]. Данные по адсорбции полимера и коэффициенту уменьшения фазовой проницаемости по воде при закачке полимера приведены на рис. 8 [17]:

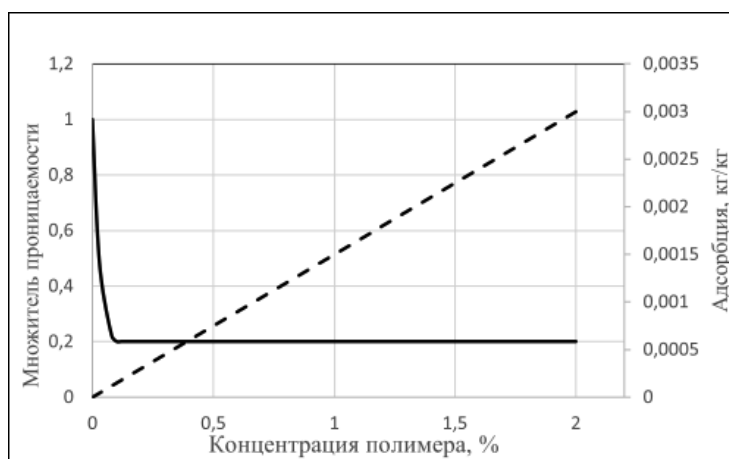


Рис. 8. Множитель фазовой проницаемости по воде и адсорбция полимера в зависимости от концентрации полимера

— Множитель проницаемости по воде - - - Адсорбция

Расчеты проводили при следующих условиях, моделирующих ОПР на месторождении Жалгистобе. Приемистость нагнетательной скважины – 100 м³/сут., минимальное забойное давление добывающих скважин равно давлению насыщения (1,14 МПа). Начальная пластовая температура: 27°С.

Принят следующий график работы нагнетательной скважины, моделирующей промышленные условия: 5 лет (1826 сут) производится закачка горячей воды с температурой 40°С, затем производится четверо суток закачка растворов полимера температурой 20°С, затем вновь производится закачка горячей воды температурой 40°С. Всего расчеты проводились на 40 лет от начала работы. Суммарная закачка раствора полимера – 400 м³. На рис. 9 показаны временные характеристики закачки воды и полимера. Геологические запасы участка составили 4040 тыс. т.



Рис. 9. Температура и концентрация полимера в закачанном флюиде

— Температура — — — Массовая концентрация закачанного полимера

Нелинейность фильтрации нефти в пористой среде за счет различия капиллярного давления в фазах впервые была показана в [18]. Впоследствии тот же подход был применен для движения целиков нефти в [19]. Нами были рассчитаны ряд вариантов при различных значениях начального градиента для фильтрации нефти, определяемого как капиллярными силами, так и свойствами фаз и особенностями пород [20-28], в которых величина начального градиента для фильтрации нефти в пористой среде оценивалась в диапазоне 0,001-0,1 МПа/м.

Были проведены расчеты при различных значениях начального градиента для фильтрации нефти, показавшие рост дополнительной добычи (эффекта от закачки полимерных систем) с ростом величины начального градиента для нефти (рис. 10).

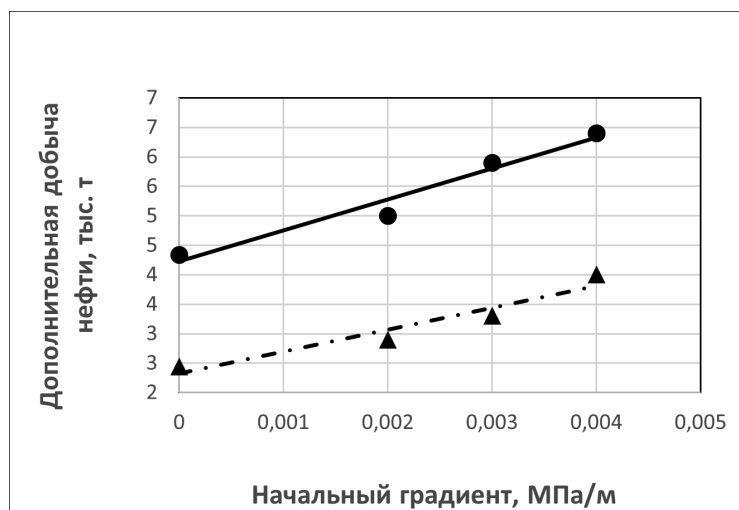


Рис. 10. Зависимость дополнительной добычи нефти при закачке полимера и псевдопластика от начального градиента для нефти через 3000 сут с начала работы скважины

▲ Полимер ● Псевдопластик

Анализ результатов расчетов при выбранных модельных параметрах полимерной системы и различных значениях начального градиента для фильтрации нефти на момент 600 суток от начала закачки полимерной системы показал, что для закачанного псевдопластичного раствора

полимера близкая к достигнутому на промысле результату в количестве 2180 т дополнительно добытой нефти достигается при величине начального градиента 0,006 МПа/м и составляет 2190 т (табл. 5).

Таблица 5

Результаты расчетов на момент 600 суток от начала закачки для различных закачиваемых агентов с различным начальным градиентом для фильтрации нефти в пористой среде

Начальный градиент, МПа/м	Параметр	Без полимера	Полимер	Псевдопластик
0	КИН. %	4,73	4,73	4,75
	Доп. добыча. тыс. т	0	-0,25	0,62
0.003	КИН. %	4,74	4,74	4,77
	Доп. добыча. тыс. т	0	-0,05	1,15
0.006	КИН. %	4,44	4,47	4,50
	Доп. добыча. тыс. т	0	1,06	2,19

Видно, что с увеличением начального градиента для нефти, определяемого свойствами пористой среды и нефти, достигаемый КИН уменьшается, а эффект от применения псевдопластичной полимерной системы увеличивается. Следовательно, математическое моделирование промысловых работ позволяет уточнить параметры пластовой системы, к которым относится и величина начального градиента для фильтрации конкретной нефти в конкретной пористой среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хавкин А.Я., Иманбаев Б.А., Шиланов Н.С. Особенности применения псевдопластичных полимерных систем в EOR-технологиях // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24, № 2. – с. 46–48.
2. Иманбаев Б.А., Шиланов Н.С., Хавкин А.Я. Применение нанополимерных систем для снижения обводненности продукции // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2021. – № 11. – с. 39–42.
3. Кадет В.В., Хавкин А.Я., Иманбаев Б.А. Применение псевдопластичной полимерной системы на месторождении Жалгистобе // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2021 – № 6 (126). – с. 46–51.
4. Казаков А.А. Методы характеристик вытеснения нефти водой. – М.: Недра, 2020. – 276 с.
5. РД-153-39.1-004 96. Методическое руководство по оценке технологической эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи. – М.: Минтопэнерго РФ, 1996. – 88 с.
6. Хавкин А.Я. Математическое моделирование физико-химических технологий повышения нефтегазоотдачи // Учебное пособие. Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2021. – 428 с.
7. Программный комплекс тНавигатор / Рок Флоу Динамикс // Москва-Тюмень, Интернет, URL: <https://rfdyn.ru/>.
8. Современные наукоемкие технологии, вып. № 12 (часть 1), 2019. – ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».
9. Nefyegas.ru, Спецпроект, Интернет, URL: Neftegaz.RU/tech-library/energogesursy-toplivo/142204-vyazkost-nefti.

10. Engineering ToolBox - Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications, 2001, Интернет, URL: <https://wiki.anton-paar.com>.
11. Особенности применения полимерно-гелевой системы SPA-WELL в технологиях выравнивания профиля приемистости / Фахретдинов Р.Н., Хавкин А.Я., Иманбаев Б.А., Шиланов Н.С. // Естественные и технические науки. – 2020. – № 1. – с. 99–102.
12. Полимерное заводнение: лабораторные исследования образцов частично гидролизированных полимеров в свободных объемах при проектировании внедрения технологии. 17 января 2024. Neftegas.ru, ГМС группа.
13. Нефтегазовый портал Петродайджест, Интернет, URL: <https://petrodigest.ru/terms/fizicheskie-svoystva-nefti>).
14. Таблицы удельной теплоемкости веществ (газов, жидкостей и др.). // Интернет, URL: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/tablitzy-udelnoj-teploemkosti-veshhestv>).
15. Thermalinfo - справочник по тепловым и физическим свойствам веществ и материалов. // Интернет, URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov>).
16. Практический инжиниринг резервуаров, 2008, Москва-Ижевск.
17. Применение полимерных растворов для увеличения коэффициента охвата вытеснением, журнал «Neftegas.ru», 23 июня 2023.
18. *Rapoport L.A., Leas W.J.* Properties of linear waterfloods //Trans. AIME. – v.198. – 1953. – p. 139–148.
19. Желтов Ю.В., Хавкин А.Я. Вопросы доработки заводненных залежей // Нефтяная промышленность, сер. Нефтепромысловое дело. – 1982. – № 9. – с.9-10.
20. *Хавкин А.Я.* Физические аспекты многофазной фильтрации в пористой среде // Нефтяная пром-ть, Обзорн.информ, сер. Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1991. – 60 с.
21. *Хавкин А.Я.* Гидродинамика многофазной фильтрации в пористой среде // Нефтяное хозяйство. – 1991. – № 5. – с. 23–27.
22. *Хавкин А.Я.* Модель вытеснения нефти в пористых средах // ДАН. – 1998. – Т.358. – № 2. – С. 193–195.
23. *Хавкин А.Я.* Закономерность вытеснения нефти в пористых средах // Научные открытия. Сб. кратких описаний за 1998 г., М.–Н.Новгород: РАЕН. – 1999. – С. 53–54.
24. *Хавкин А.Я.* Гидродинамические основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами // М.: МО МАНПО. – 2000. – 525 с.
25. *Хавкин А.Я.* Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа / Под ред. чл.-корр. РАН Г.К.Сафаралиева // М., ИИКИ, 2010, 692 с.
26. *Хавкин А.Я.* Влияние пористой среды на нелинейность фильтрации // Естественные и технические науки, 2018, № 9.– с.44–49.
27. *Хавкин А.Я., Хавкин Б.А.* Влияние неньютоновских свойств нефти на КИН при вытеснении нефти разноминерализованными полимерными растворами // «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям». Материалы VI Международной Конференции в г. Москва 20–21 ноября 2018г., М.: ОАО «Творческая мастерская», 2018. – с.159–162.
28. *Хавкин А.Я.* Физика нефтегазовых пластов и нелинейные явления // Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина. – 2019. – 288 с.